



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE MR SPOJKY

Design of magnetorheological clutch

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VLADISLAV NOVÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAKUB ROUPEC

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vladislav Nováček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstruční inženýrství (2301T037)**

Reditel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a

zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce MR spojky.

v anglickém jazyce:

Design of magnetorheological clutch.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh magnetorheologické spojky pro demonstrační účely s

těmito parametry: max. krouticí moment: 10 Nm

max. výstupní otáčky: 6000 ot./min

rozsah regulace otáček: 0-6000 ot./min

životnost MR uzlu: 1000 hod při 3500 ot./min

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cíle práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma diplomové práce: průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ práce: konstrukční

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK.

Seznam odborné literatury:

GONCALVES, F.D., AHMADIAN, M., CARLSON, J.D. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities, Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 1, s. 75-85. Lord Materials Division, Magnetic Circuit Design, Engineering Note, December 1999.

Lord Materials Division, Designing with MR Fluids, Engineering Note, November 1999.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Roupec

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Dekan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá konstrukcí magnetoreologické (MR) spojky. V první části byla zpracována rozsáhlá rešerše a vyhodnocení kladů a záporů jednotlivých konstrukčních variant MR spojek a brzd. V druhé části byl proveden analytický výpočet magnetického obvodu spojky a v závislosti na výsledcích byla provedena samotná konstrukce spojky. V poslední části práce bylo provedeno několik experimentů pro ověření funkčnosti některých hlavních konstrukčních uzlů i celkové funkčnosti spojky.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetoreologická, MR, spojka, brzda, krouticí moment

ABSTRACT

This thesis deals with the design of the magnetorheological (MR) clutch. The extensive literature research with particular conclusions to each design variant of MR clutches or brakes has been done in the first part of the thesis. The second part of the thesis describes the design of the actual MR clutch based on the results of the analytical calculation of the magnetic circuit. Finally, the experiments verifying the function of the key segments of the clutch, and the whole clutch are summarized in the third part of the thesis.

KEY WORDS

Magnetorheological , MR, clutch, brake, torque

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁČEK, V. *Konstrukce MR spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Konstrukce MR spojky“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jakuba Roupce, s využitím doporučené literatury.

V Brně dne 25. května 2011

.....
Bc. Vladislav Nováček

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto způsobem poděkovat vedoucímu práce Ing. Jakubu Roupcovi za odborné vedení práce, věcné rady a celkovou podporu při vypracovávání diplomové práce.

OBSAH

1. ÚVOD	13
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Teorie MR kapalin	14
2.2 Výpočty s MR kapalinami	15
2.2.1 Zvážení konstrukcí a výkonnosti MR spojek	15
2.2.2 Kritické faktory ovlivňující MR kapaliny v automobilových systémech	18
2.2.3 Zahřívání MR diferenciálu s limitovaným prokluzem	20
2.3 Konstrukce MR spojek	22
2.3.1 Dvojdisková MR spojka	22
2.3.2 Multidiskový MR diferenciál s limitovaným prokluzem	26
2.3.3 MR spojka pro ventilátor nákladních automobilů	27
2.3.4 MR spojka s převrácenou přenosovou charakteristikou	29
2.4 Konstrukce MR brzd	31
2.4.1 Vývoj MR brzdy pro hmatovou odezvu virtuální reality	31
2.4.2 MR spojka pro hmatové renderování	32
2.4.3 Komerční MR brzda	33
2.4.4 MR brzda pohonu endoprotézy	34
2.4.5 Radiální MR brzda se serpentinovou trajektorií magnetického toku	36
2.5 Zhodnocení konstrukcí MR spojek	39
3. FORMULACI ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA	40
3.1 Formulace řešeného problému	40
3.2 Technická analýza	40
3.3 Vývojová analýza	40
4. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	41
5. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	42
6. NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	43
6.1 MR spojka s jednou rotorovou lamelou	43
6.2 MR spojka se dvěma rotorovými lamelami	48
6.3 Výběr optimálního řešení	53
7. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	55
7.1 MR mezera	55
7.2 Rotorová část	58
7.2.1 Ložisko	58
7.2.2 Vstupní hřídel	61
7.2.3 Rotorové lamely	64
7.3 Statorová část	65
7.3.1 Statorová lamela	66
7.3.2 Rámeček	69
7.3.3 Příložka	70
7.3.4 Pravá část statoru	71
7.3.5 Statorová hřídel	76
7.3.6 Levá část statoru	77
7.3.7 Elektromagnetická cívka	78
7.4 Těsnění MR spojky	79

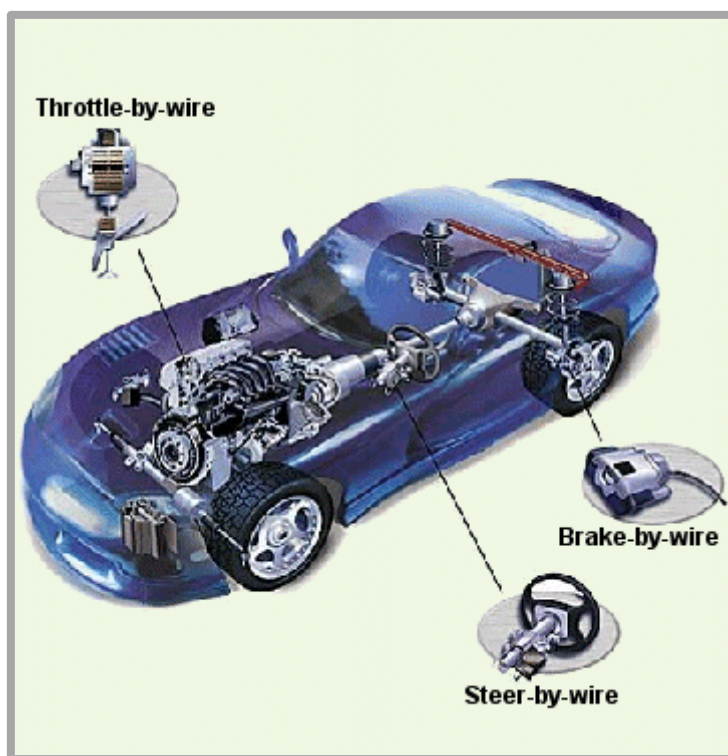
7.5 Montáž	82
7.6 Experimentální ověření magnetického pole	82
7.7 Hmotnostní rozvaha	86
7.8 Zkušební provoz	87
7.9 Ekonomická rozvaha	90
8. ZÁVĚR	91

1. ÚVOD

Se současným rozvojem výpočetní techniky a automatizace se v průmyslu v široké míře prosazují technologie X-by-Wire. Jedná se o technologii, při které je mechanické zařízení ovládáno pouze pomocí elektrických impulsů. Tento trend se nevyhýbá ani technologickým odvětvím, které se zabývají přenosem mechanických sil.

Magnetoreologické (MR) kapaliny jsou pro použití v tomto odvětví ideální, jelikož je u nich možno změnit některé fyzikální vlastnosti (viskozita, mez kluzu) pomocí vnějšího magnetického pole. Se změnou fyzikálních vlastností kapaliny pak dochází ke změně chování mechanického zařízení, ve kterém je kapalina použita. Ačkoliv je tato vlastnost MR kapalin velice zajímavá pro použití v průmyslové praxi, využívají se v současnosti stále dost zřídka. Hlavním důvodem je, že pozitivní vlastnosti MR kapalin jsou většinou vyvažovány nepříznivými vlastnostmi jako je vysoká cena, vysoká hustota a relativně nízká životnost.

Tato práce se zabývá konstrukcí experimentální MR spojky jakožto rotačního MR zařízení s potenciálem pro příští využití v experimentech s MR kapalinami. Konstrukce se tedy zaměřuje na sestavení MR spojky pro trvanlivostní zkoušky MR kapalin, ve které bude zároveň možné měřit přímo teplotu náplně.



Obr. 1.1 X-by-Wire [1]

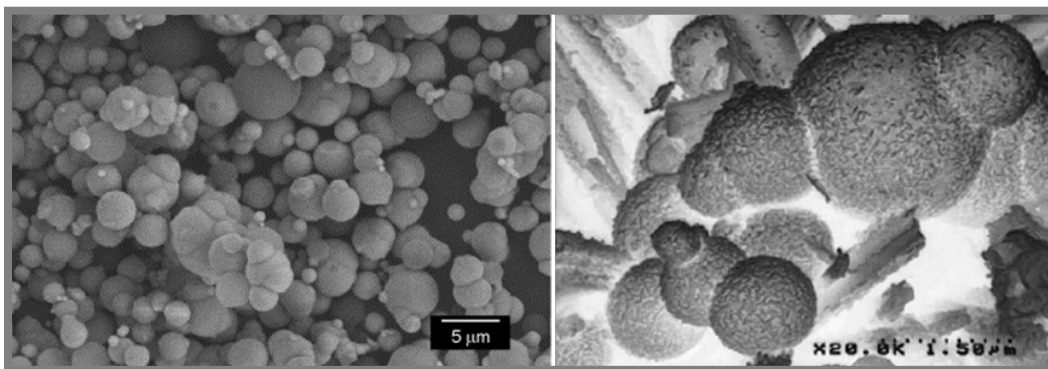
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Teorie MR kapalin

Magnetoreologické (MR) kapaliny jsou materiály patřící do kategorie tzv. *Smart materiálů*. Jejich potenciál leží v jejich unikátním složení, které jim umožňuje měnit svoji viskozitu a mez kluzu v závislosti na velikosti aplikovaného vnějšího magnetického pole. Není-li MR kapalina vystavena vnějšímu magnetickému poli (neaktivovaný stav), chová se jako kapalina podobná např. hustému oleji nebo medu. Ocítne-li se však v magnetickém poli (aktivovaný stav), začne tuhnout a její skupenství se podobá spíše tuhému gelu nebo pastě na boty. Důležité je, že ke ztuhnutí MR kapaliny dochází v řádech setin vteřiny a celý proces je možno zvrátit jednoduše odstraněním magnetického pole za přibližně stejnou dobu. MR kapaliny jsou směsí magnetických částic o průměru několika mikrometrů rozptýlených v nosné kapalině.

Jako nosnou kapalinu lze použít například i vodu. MR kapaliny na její bázi mají dobrý viskozitní index a jsou cenově příznivé. Na druhou stranu MR kapaliny na vodní bázi mají několik nevýhod, které kladné vlastnosti převáží. Jedná se o problémy s oxidací a korozí částic. Navíc mají tyto kapaliny vysokou hustotu a velmi nízký bod varu. Z těchto důvodů je vhodnější jako nosnou kapalinu používat základové oleje. Nejvýznamnější z nich pro praxi jsou syntetické uhlovodíky (polyalfaolefiny) a syntetické oleje (cykloalkany, alkylaromáty, polybuteny). Použití čistě základového oleje pro přípravu MR kapaliny je možné, ale takto připravená kapalina se hodí spíše pro základní výzkum mechanických a magnetických vlastností. Základové oleje totiž neobsahují žádná aditiva, jako jsou detergenty, antioxidanty a disperzanty. Tato aditiva jsou pro použitelnost MR kapalin velice důležitá, jelikož i několikanásobně zvyšují jejich životnost.

Částice MR kapalin se vyskytují v mnoha různých formách. Liší se velikostí, materiálem i strukturou. V současnosti jsou nepoužívanější částice z karbonylového železa (CI) nebo železa redukováného vodíkem klasické struktury. V některých případech se začínají prosazovat částice s kompozitní strukturou. Tyto částice vykazují ekvivalentní magnetické vlastnosti a řeší problémy s oxidační a sedimentační stabilitou. Proto se na výzkum částic s kompozitní strukturou soustřeďuje velká pozornost [2].



Obr. 2.1 Částice klasické struktury z CI (vlevo), kompozitní částice Fe-Ni (vpravo) [3,4]

2.2 Výpočty s MR kapalinami

2.2

2.2.1 Zvážení konstrukcí a výkonnosti MR spojek

2.2.1

LAMPE, D., THESS, A., DOTZAUER, C., *MR - Clutch - Design considerations and performance*, Dresden University of Technology, 1998, Dresden Germany.

Je známo, že MR kapaliny se v tekutém (neaktivovaném) stavu chovají podle Binghamova plastického modelu:

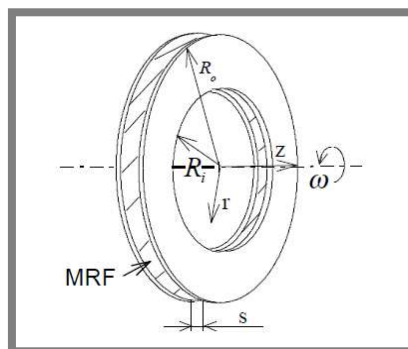
$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

kde:

τ	MPa	- smykové napětí
τ_0	MPa	- mez kluzu
η	Pa · s	- dynamická viskozita
$\dot{\gamma}$	s ⁻¹	- smykový spád

Přeměna z tuhého do tekutého stavu se děje s jinou mezí kluzu ($\tau_{y,s}$ statické smykové napětí) než opačný děj ($\tau_{y,d}$ dynamické smykové napětí). Pro MR spojky je vhodné, aby docházelo pouze k minimální změně přenášeného krouticího momentu při přeměně kapaliny z aktivovaného (zamčeného) stavu do stavu neaktivovaného (prokluz).

MR spojky s axiální MR mezerou



Obr. 2.2 Schematický náčrt funkčního řetězce MR spojky s axiální mezerou [7].

Aktivovaný (solid) stav

Při přenosu krouticího momentu v aktivovaném stavu roste smykové napětí s vzrůstajícím poloměrem (vzdáleností od osy otáčení):

$$\tau(r) = C \cdot r \quad (2)$$

kde:

$\tau(r)$	MPa	- závislé smykové napětí
r	mm	- vzdálenost od osy otáčení
C	1	- konstanta

Vazebná podmínka pro maximální krouticí moment je:

$$\tau(R_0) = \tau_{y,s} \quad (3)$$

Z předchozích rovnic pak vyplývá, že:

$$\tau(r) = \tau_{y,s} \frac{r}{R_0} \quad (4)$$

Krouticí moment přenesený elementem kapaliny je pak:

$$dT = \tau(r) 2\pi r^2 dr \quad (5)$$

Integrací tohoto vzorce v mezích dle obrázku (Obr. 2.2) dostaneme maximální krouticí moment v aktivovaném stavu:

$$T_{max,stat} = \pi \tau_{y,s} \frac{(R_0^4 - R_i^4)}{2R_0} \quad (6)$$

kde:

$T_{max,stat}$	N m	- maximální krouticí moment v aktivovaném stavu
R_0	mm	- velký poloměr pracovní plochy
R_i	mm	- malý poloměr pracovní plochy

Neaktivovaný (liquid) stav

Pro malá Reynoldsova čísla ($<10^4$) lze profil rychlosti mezi sousedními disky vyjádřit jako:

$$\frac{\partial}{\partial z} v_{azimuthal}(r, z) = \frac{r(\omega_1 - \omega_2)}{s} = const. \quad (7)$$

kde:

$v_{azimuthal}(r, z)$	$m s^{-1}$	- rychlost v souřadnicích (r, z)
ω_1	$rad s^{-1}$	- úhlová rychlost prvního disku
ω_2	$rad s^{-1}$	- úhlová rychlost druhého disku

Smykové napětí lze pomocí předchozích vztahů odvodit rovnicí:

$$\tau(r) = \tau_{y,d} + \eta(\omega_1 - \omega_2) \frac{r}{s} \quad (8)$$

kde:

s	mm	- šířka MR mezery
-----	----	-------------------

Krouticí moment v neaktivovaném stavu je potom dán vztahem:

$$T_{dynamic} = \pi \tau_{y,d} \frac{2(R_0^3 - R_i^3)}{3} + \pi \eta \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{2s} (R_0^4 - R_i^4) \quad (9)$$

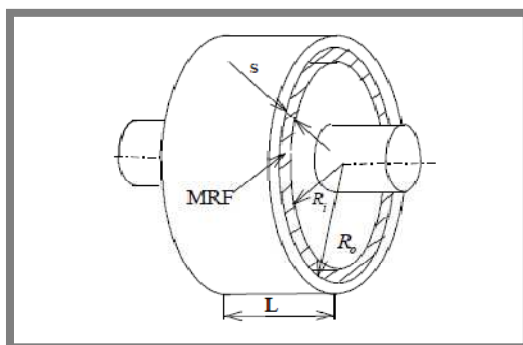
Minimální krouticí moment nastane při vyrovnání úhlových rychlostí:

$$T_{min,dyn} = \pi \tau_{y,d} \frac{2(R_0^3 - R_i^3)}{3} \quad (10)$$

Při přechodu mezi stavem aktivovaným a neaktivovaným nastane skoková změna přenášeného krouticího momentu:

$$\pi \tau_{y,s} \frac{(R_0^4 - R_i^4)}{2R_0} \Rightarrow \pi \tau_{y,d} \frac{2(R_0^3 - R_i^3)}{3} \quad (11)$$

MR spojka s radiální MR mezerou



Obr. 2.3 Schématický náčrt funkčního řetězce MR spojky s radiální mezerou [7].

Aktivovaný (solid) stav

Pro malé mezery je maximální přenášený krouticí moment dán vztahem:

$$T_{max,stat} = \frac{\pi}{2} (R_0 + R_i)^2 L \tau_{y,s} \quad (12)$$

kde:

L mm - délka MR mezer

Neaktivovaný (liquid) stav

Proudění mezi dvěma rotujícími válci je základní úloha mechaniky tekutin:

$$T_{dynamic} = \frac{\pi}{2} (R_0 + R_i)^2 L \tau_{y,d} + 4\pi L \eta \frac{(\omega_1 - \omega_2) R_0^2 R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \quad (13)$$

Limitní krouticí moment bude přenášen, pokud se vyrovnají úhlové rychlosti obou válců:

$$T_{min,dyn} = \frac{\pi}{2} (R_0 + R_i)^2 L \tau_{y,d} \quad (14)$$

Přechod mezi aktivovaným a neaktivovaným stavem způsobuje změnu přenášeného krouticího momentu:

$$\frac{\pi}{2} (R_0 + R_i)^2 L \tau_{y,s} \Rightarrow \frac{\pi}{2} (R_0 + R_i)^2 L \tau_{y,d} \quad (15)$$

Porovnání MR spojky s axiální a radiální MR mezerou

Krouticí momenty MR spojky s radiální mezerou $T_{min,dyn}$ a $T_{max,stat}$ mají stejnou závislost na geometrických parametrech spojky. V případě spojky s axiální mezerou tomu tak není. Během přechodu mezi aktivovaným a neaktivovaným stavem bude vždy nastávat nechtěný skok v přenášeném krouticím momentu. Pro MR spojku s axiální mezerou může být tomuto nechtěnému jevu zamezeno volbou vhodných rozměrů vnitřního a vnějšího poloměru disku spojky [7].

Shrnutí:

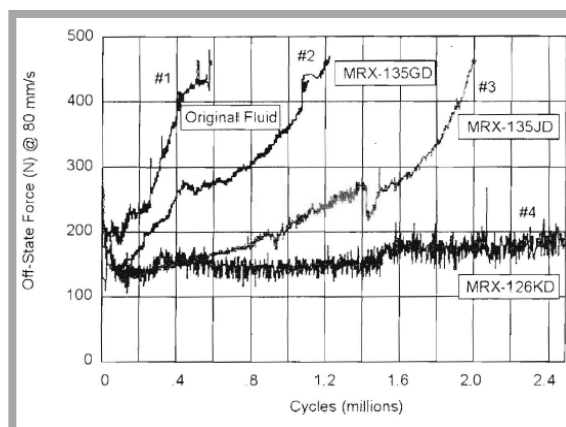
- byl popsán postup jakým spočítat maximální statický a dynamický krouticí moment pro MR spojky s radiální a axiální mezerou
- byly porovnány konstrukce MR spojky s radiální a axiální mezerou

2.2.2 Kritické faktory ovlivňující MR kapaliny v automobilových systémech

CARLSON, J. D. Critical factors for MR fluids in vehicle systems. *International Journal of Vehicle Design*. 2003, 33, 1-3, s. 207-217.

Kvalitu MR kapaliny ovlivňují především dva hlavní faktory. Je to velikost magneticky indukované meze kluzu a sedimentační stabilita.

Pro některé druhy MR zařízení, zejména pak MR tlumiče malých rozměrů, je rozhodující, aby měla MR kapalina v neaktivovaném stavu nízkou viskozitu. U většiny MR kapalin, které jsou vystaveny vysokému namáháním, dochází k takzvanému provoznímu houstnutí (In-Use-Thickening IUT = Kapalina začíná zvyšovat postupem času svoji viskozitu v neaktivovaném stavu.) MR kapalina s původně nízkou viskozitou progresivně houstne, až se nakonec změní v tuhou pastu podobnou vosku nebo leštidlu na boty. Příčinu lze hledat v odrolování oxidických vrstev z povrchu železných částic. Tyto vrstvy jsou velice tvrdé a křehké a při mechanickém namáhání se z povrchu částic odlupují. Může rovněž dojít k úplnému rozlomení některých částic na více menších dílů. V porovnání s původními částicemi mají tyto sekundární částice menší rozměry a vyšší poměr velikosti povrchu ke hmotnosti částice.



Obr. 2.4 Graf závislosti síly v neaktivovaném stavu na počtu cyklů (čase) [8].

V závislosti na prostředí a aplikaci každá MR kapalina nakonec podlehně nějakému degradačnímu procesu. Velikost tohoto znehodnocení všeobecně závisí na smykovém spádu (shear rate), teplotě a čase. Za účelem kvantifikace těchto vlivů byl zaveden parametr LDE (life dissipated energy).

$$LDE = \frac{1}{V} \int_0^{life} P dt \quad (16)$$

kde:

LDE	$J\ cm^{-3}$	- parametr LDE (life dissipated energy)
P	W	- výkon zařízení
V	m^3	- objem MR kapaliny v zařízení

Tento parametr udává mechanickou energii na jednotku objemu, která se během životního cyklu (dokud je MRF použitelná v reálném zařízení) přeměnila na teplo. Nejvyšší MR kapaliny dosahují LDE v řádu $10^7\ J/cm^3$. Horší MR kapaliny mohou být nepoužitelné už při LDE v řádu $10^5\ J/cm^3$ [8].

Shrnutí:

- byl popsán parametr LDE MR kapalin jako možnost hodnocení trvanlivosti kapaliny
- byly popsány meze, v nichž by se měl pohybovat LDE kvalitních MR kapalin
- při výpočtu LDE parametru není uvažována teplota MR kapaliny
- v lineárních MR zařízeních (tlumičích) při normálních pracovních podmínkách (0,05 – 0,2 m/s) dochází k dosažení smykových spádů v rozmezí $1 \times 10^4 - 4 \times 10^4\ s^{-1}$, měrný výkon se pak v takovýchto zařízeních pohybuje okolo hodnoty $20\ W/cm^3$ (v extrémních případech jako u tlumičů terénních automobilů však i $50\ W/cm^3$)
- u rotačních MR zařízení (spojek a brzd) MR kapalina namáhána více než u lineárních zařízení, za normálních pracovních podmínek (100 – 1000 ot/min) dosahuje smykový spád hodnot $10^3 - 10^4\ s^{-1}$, měrný výkon se pak pohybuje v rozmezí $13 - 130\ W/cm^3$

2.2.3 Zahřívání MR diferenciálu s limitovaným prokluzem

KAVLICOGLU, B. M., et al. Heating of a High-torque magnetoreological fluid limited slip differential clutch. *Journal of intelligent material systems and structures*. 2008, 19, s. 235-241.

V článku je popsána teplotní analýza vysoko-momentové, multi-diskové MR spojky (Obr. 2.9) pro diferenciál s omezeným prokluzem (limited slip differential). Byla provedena analýza soustředného systému (lumped system analysis) za účelem získání teploty MR spojky jako funkce času. Tento přístup je možný pokud je Biotovo číslo (Bi) menší než 0,1. Biotovo číslo je bezrozměrný parametr, který určuje, zdali se teplota uvnitř tělesa značně liší od teploty povrchu tělesa který je chlazen nebo ohříván. Biotovo číslo je definováno vztahem:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (17)$$

kde:

h	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	- koeficient přestupu tepla
k	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	- tepelná vodivost
L_c	m	- charakteristický rozměr vypočtený podle (18)

Charakteristická délka spojky L_c je daná vztahem:

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (18)$$

kde:

V	m^3	- objem
A_s	m^2	- plocha povrchu

Jelikož převážná většina součástí spojky je z oceli, celková teplotní vodivost byla zvolena 37,7 W/mK. Spojka byla ochlazována pouze okolním vzduchem. Z tohoto důvodu byla nominální hodnota koeficientu přestupu tepla prouděním stanovena 28 W/m²K. Pro kontrolní objem platí energetická rovnováha:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU}{dt} \quad (19)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum_n m c_p \frac{d\theta}{dt} \quad (20)$$

$$\dot{Q} = -hA_s(\theta_{(t)} - \theta_{amb}) \quad (21)$$

kde:

Q	J	- dodané teplo
W	J	- vykonaná práce
U	J	- vnitřní energie
t	s	- čas

$(\theta_{(t)} - \theta_{amb})$ deg - rozdíl teploty spojky a okolí

Spotřeba energie v kontrolním objemu MR spojky je dán rozdílem příkonu spojky a jejího výkonu:

$$P = -(P_{motor} + P_{electrical}) + T_{out}\omega_{out} \quad (22)$$

$$P_{electrical} = I^2 R \quad (23)$$

kde:

P_{motor}	W	- výkon motoru
$P_{electrical}$	W	- příkon
T_{out}	N m	- výstupní krouticí moment
ω_{out}	rad s ⁻¹	- výstupní úhlová rychlost
I	A	- proud
R	Ω	- odpor cívky

$$\begin{aligned} & [-hA_s(\theta_{(t)} - \theta_{amb})] - [-(P_{motor} + P_{electrical}) + T_{out}\omega_{out}] = \\ & = \sum_n mc_p \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (24)$$

Řešení rovnice (24) má dva kořeny a proto lze zvyšování teploty spojky rozdělit na tři různé případy:

- 1) ohřívání spojky vlivem přeměny elektrické energie na teplo uvnitř elektromagnetické cívky
- 2) ohřívání spojky vlivem přeměny mechanické energie na teplo uvnitř tokového kanálu (MR mezery)
- 3) kombinací předchozích

Teoretické výsledky byly ověřeny experimentálně. K měření změny teploty MR spojky byly použity dva termočlánky. Kladný vodič byl vyroben z chromelu, záporný vodič z alumelu. První termočlánek byl připojen k čelu šasi MR spojky aby měřil teplotu v radiálním směru. Druhý termočlánek byl připevněn k vnějšímu obvodu spojky, aby měřil teplotu v axiálním směru.

Teploty byly zaznamenávány po desetiminutovém intervalu. Přívod elektrické energie zajišťovaly dva 60 V zdroje, na závity cívky byly přivedeny proudy 1, 2 nebo 3 A. Vstupní hřídel se otáčela rychlostí 120 ot/min, výstupní hřídel byla fixována. Hodnoty změn teploty spojky za 10 min s ohledem na zdroj tepla jsou v Tabulce 2.1 [9].

Tabulka 2.1 Změny teplot částí spojky po 10 min intervalu

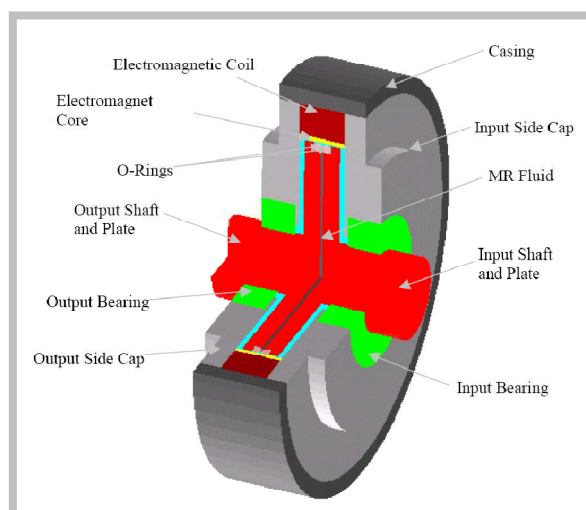
Zdroj tepla	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ čelo šasi	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ bok šasi	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ teoretická hodnota
Viskozitní kluz	1,0	0,9	0,9
Cívka 1 A	1,1	0,8	1,1
Cívka 2 A	4,1	3,9	4,0
Cívka 3 A	16,0	15,8	15,2
Viskozitní kluz + cívka 1 A	11,9	11,5	11,6
Viskozitní kluz + cívka 2 A	19,5	18,9	18,3
Viskozitní kluz + cívka 3 A	29,9	28,9	27,2

Shrnutí:

- byla provedena teplotní analýza MR spojky
- byly analyzovány různé zdroje tepla a jejich vliv na celkovou teplotu MR spojky)
- teoretické výsledky dávají nižší změnu teploty než experiment (rozdíl je menší než 8%)
- přenesený krouticí moment není příliš závislý na teplotě
- Cívka MR tlumiče Delphi má při proudu 2 A výkon 2W, ohřeje cívku o 10°C za 7min.

2.3 Konstrukce MR spojek**2.3.1 Dvojdisková MR spojka**

KAVLICOGLU, B. M, et al. A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch , Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego. 2002.

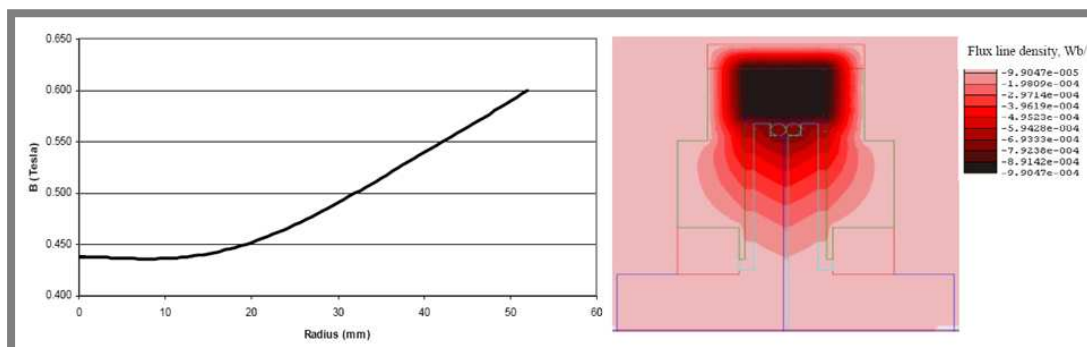


Obr. 2.5 Řez spojkou dle Kavlicogluovy konstrukce [10].

Byl zkonstruován prototyp dvojdiskové MR spojky s axiální MR mezerou. Jedná se o spojku s axiální mezerou pro MR kapalinu o průměru 51.94 mm. Disky jsou

připojeny ke vstupní a vstupní hřídeli o průměru 30 mm. Elektromagnetický obvod sestává z elektromagnetické cívky, která je namotána okolo jádra. Celá sestava je umístěna ve válcovém pouzdře o vnějším průměru 152.4 mm a tloušťce stěny 6,35 mm. Úniku MR kapaliny je zamezeno použitím dvou o-kroužků. MR spojka je aktivována připojením konců cívky elektromagnetu ke zdroji proudu. Celková šířka spojky je 31,75 mm.

V programu Maxwell Ansoft byla provedena MKP analýza magnetického pole za účelem optimalizace geometrie a materiálového rozložení spojky. Bylo zjištěno, že hustota magnetického pole je funkcí vzdálenosti od osy otáčení spojky.



Obr. 2.6 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od osy otáčení [10].

Pro určení možného maximálního přeneseného krouticího momentu byl použit Binghamův model. Celkové smykové napětí v kapalině se určí:

$$\tau = \tau_y + \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \cdot \mu_p \frac{\partial u}{\partial y} \quad (25)$$

kde:

τ	MPa	- napětí ve smyku
τ_y	MPa	- mez kluzu
$\frac{\partial u}{\partial y}$	s ⁻¹	- smykový spád
μ_p	Pa s	- dynamická viskozita

τ_y je funkcí magnetického pole, zatímco μ_p je konstantní. První část pravé strany rovnice tak vytváří krouticí moment, který závisí na magnetickém poli, druhá část popisuje krouticí moment způsobený samotnou viskozitou kapaliny. Proto je výsledný (výstupní) krouticí moment:

$$T_{out} = T_{MR} + T_{vis} \quad (26)$$

kde:

T_{out}	N m	- výstupní krouticí moment
T_{MR}	N m	- krouticí moment způsobený MR efektem
T_{vis}	N m	- krouticí moment způsobený viskozitou kapaliny

Pro odvození T_{MR} je potřeba znát vztah mezi mezí kluzu MR kapaliny τ_y a magnetickou indukcí cívky B . Tento vztah lze získat experimentálně pro kapalinu vlastní výroby nebo z technických listů komerční MR kapaliny.

Jelikož je magnetická indukce funkcí radiální souřadnice rozměru spojky, může být pro danou geometrii MR krouticí moment:

$$T_{MR} = 2\pi \int_0^{r_0} \tau_y(r, B) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) r^2 dr \quad (27)$$

kde:

r_0 mm - velký poloměr pracovního prostoru

Pro malou šířku mezery MR kapaliny je možné odvodit tangenciální rychlost kapaliny za předpokladu lineární distribuce rychlostí a podmínky nulového prokluzu jako:

$$u(r, y) = \frac{r \cdot \Delta\omega}{g} \cdot y + \omega_2 \cdot r \quad (28)$$

kde:

$\Delta\omega$	rad s ⁻¹	- změna úhlové rychlosti ($\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$)
ω_1	rad s ⁻¹	- úhlová rychlost prvního disku (lamely)
ω_2	rad s ⁻¹	- úhlová rychlost druhého disku (lamely)
g	mm	- šířka MR mezery
r	mm	- vzdálenost od osy otáčení (radiální souřadnice)

Smykový spád získáme derivací rovnice (28) podle y :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{r \cdot \Delta\omega}{g} \quad (29)$$

Substitucí dostaneme MR krouticí moment :

$$T_{MR} = 2\pi \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2) \int_0^{r_0} \tau_y(r, B) r^2 dr \quad (30)$$

Krouticí moment od viskozitní části může být vypočten numerickou derivací a je dán vztahem:

$$T_{vis} = \frac{\pi \mu_p \Delta\omega r_0^4}{2g} \quad (31)$$

Jelikož krouticí moment způsobený viskozitou MR kapaliny T_{vis} je v porovnání s magnetoreologickým momentem T_{MR} velice malý, můžeme ho zanedbat.

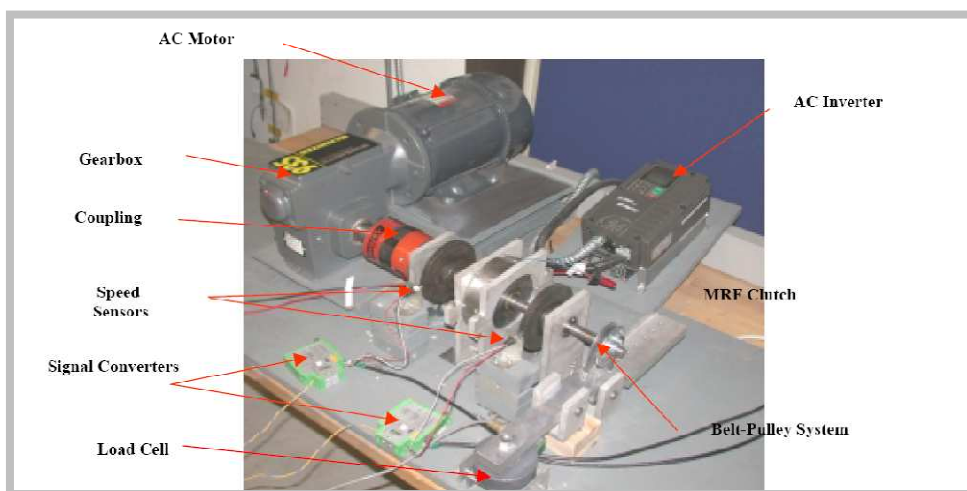
Pro výstupní krouticí moment vyjádřený jako funkce proudu pak:

$$T_{out} \cong T_{MR} = C_1 I^{C_2} \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2) \quad (32)$$

kde:

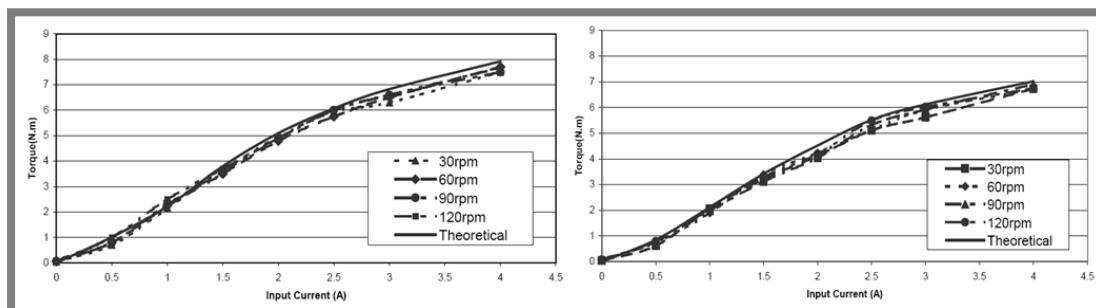
C_1	N m I^{-1}	- konstanta získaná z MKP analýzy
C_2	1	- konstanta získaná z MKP analýzy

Teoretické výpočty byly ověřeny i experimentálně pro MR kapaliny UNR-MRPG a LORD-MRF132LD na zařízení vlastní konstrukce (Obr. 2.7).



Obr. 2.7 Zkušební řetězec MR spojky [10].

Z výsledků je zřetelné, že rychlost vstupní hřídele má minimální efekt na přenesený krouticí moment. Pro MR kapalinu UNR-MRPG byla spojka schopna přenést maximální krouticí moment 7,9 Nm při proudu 4 A. Komerční MR kapalina LORD-MRF132LD přenesla maximálně 6.9 Nm při stejném proudu [10].



Obr. 2.8 Grafy závislosti krouticího momentu na proudu pro MR kapaliny UNR-MRPG (vlevo) a LORD-MRF132LD (vpravo) [10].

Shrnutí:

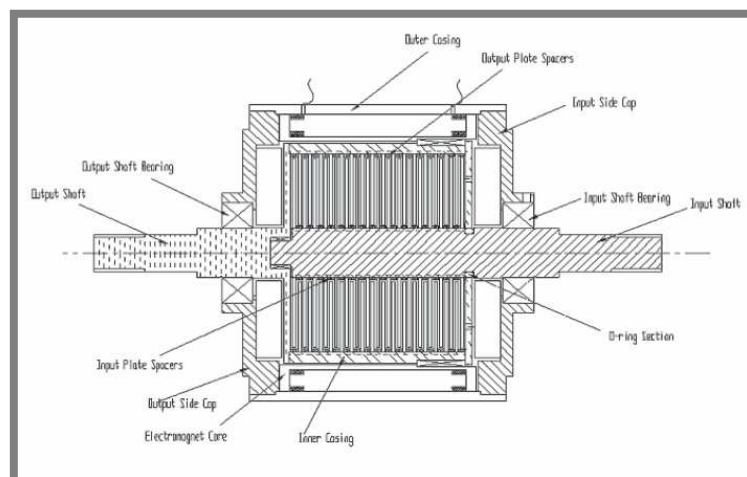
- byla popsána geometrie (s hlavními rozměry) MR spojky s axiální mezerou
- byl podrobně rozebrán postup jak analyticky spočítat maximální možný přenesený krouticí moment MR spojkou s axiální mezerou
- byl sestaven a podrobně popsán způsob, jakým byla experimentálně testována funkčnost MR spojky

- nebyl popsán vliv stárnutí MR kapaliny na velikost přeneseného krouticího momentu
- nebyl popsán způsob, jakým se řešilo chlazení MR spojky
- nebyla popsána elektromagnetická cívka (závity)
- ve spojce je malé množství kapaliny, kapalina bude velice silně namáhána (při otáčkách 30 ot/min dosáhne $LDE = 10^7 \text{ J/cm}^3$ za zhruba 28000 otáček)
- ve spojce bude docházet k opotřebování o-kroužků

2.3.2 Multidiskový MR diferenciál s limitovaným prokluzem

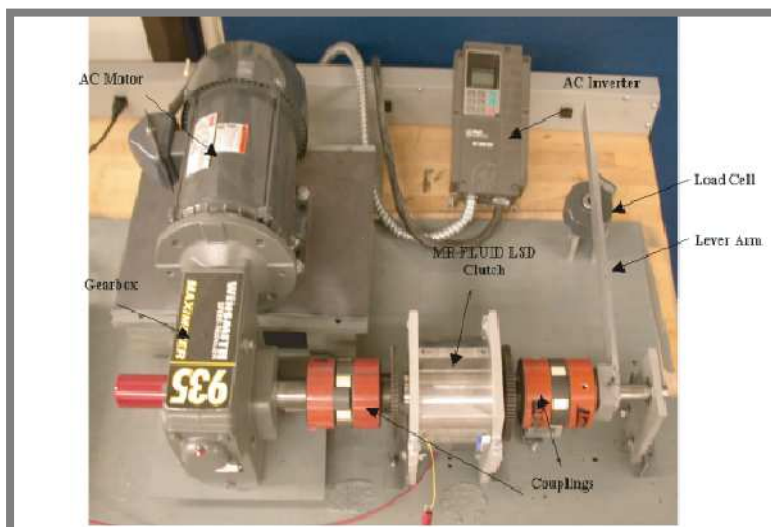
KAVLICOGLU, B. M., et al. A multi-plate magneto-rheological fluid limited slip diferenciál clutch. *Smart structures and materials*. 2003, 5054, s. 341–349.

MR spojka obsahuje 43 disků. Magnetický obvod spojky sestává z elektromagnetické cívky, která je navinuta kolem jádra. Celý mechanismus spojky je uložen ve válcovém šasi o vnějším průměru 152,4 mm. Toto šasi zároveň funguje jako zpětná větev magnetického obvodu. Celková délka spojky je rovněž 152,4 mm. Soustava 43 disků (lamel) je umístěna uvnitř vnitřního obalu (šasi) o vnějším průměru 114,3 mm. Mezi každým párem disků (lamel) je mezera 0,5 mm pro MR kapalinu.



Obr. 2.9 Řez MR spojkou podle konstrukce Kavlicoglu [11].

Pro ověření výstupních charakteristik, které byly vypočítány analyticky i za pomoci MKP analýzy, byl sestaven zkušební řetězec.



Obr. 2.10 Testovací řetězec podle Kavlicoglu [11].

Spojka byla navržena tak, aby byla schopna přenést vysoký krouticí moment, ale ne vysoké otáčky. Jelikož se jedná o spojku, která by měla nahradit diferenciál, byl předpokládán rozdíl vstupních a výstupních otáček v rozmezí 30-120 ot/min. Spojka byla naplněna komerční MR kapalinou LORD MRF-132 LD. Ve statickém zkušebním režimu (výstupní hřídel byla fixována) byla spojka schopna přenést maximální krouticí moment 244 Nm pro proud 3 A přivedený na závity elektromagnetické cívky. Teoretické výsledky ukázaly, že křivka závislosti krouticího momentu na proudu dosáhne limitní (ploché) charakteristiky zhruba při 6 A. Při 6 A by tato spojka měla být schopna teoreticky přenést krouticí moment o velikosti 419 Nm [11].

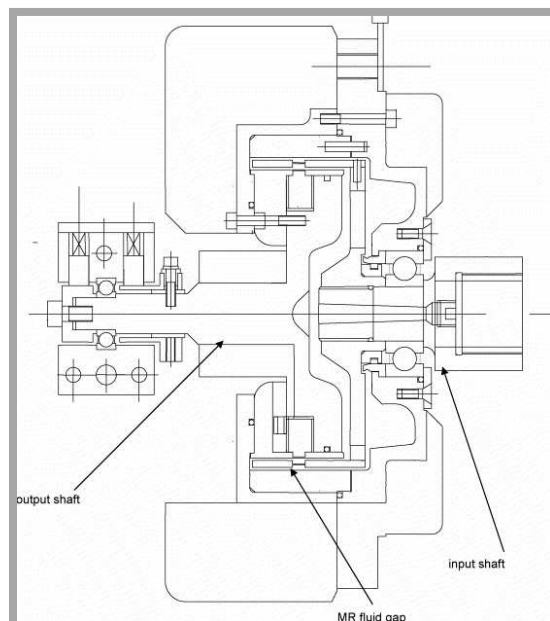
Shrnutí:

- byla částečně popsána konstrukce multi-diskové MR spojky
- byl představen a částečně popsán zkušební řetězec
- byla naměřena časová odezva (doba, za kterou se vyrovnají vstupní a výstupní otáčky) 20 ms spojky

2.3.3 MR spojka pro ventilátor nákladních automobilů

SMITH, A. L.; ULICNY, J. C.; KENNEDY, L. C. Magnetorheological Fluid Fan Drive for Trucks. *Journal of intelligent material systems and structures*. 2007, 18, s. 1131-1135.

Pro přenos krouticího momentu z motoru na hřídel ventilátoru chladiče v nákladních automobilech a SUV bylo navrženo použití MR spojky. Tato spojka má být schopna přenést 40 Nm. Pro splnění zadaných parametrů byla zvolena konstrukce MR spojky s dvojitou soustřednou pracovní MR mezerou a bubnovým rotorem.



Obr. 2.11 Náčrt řezu MR spojky Smithovy konstrukce [12].

Rotor leží v kruhové drážce mezi statorem a pouzdrem cívky. Tvoří tak 0,9 mm širokou vnitřní a vnější MR mezeru. Vstupní hřídel je spojena s motorem, otáčky jsou tedy závislé na otáčkách motoru. MR kapalina zaplavuje především vnitřní a vnější mezeru. Spojka obsahuje 51,2 cm³ MR kapaliny. Elektromagnetický obvod tvoří cívka se 110 závitů, pouzdrem cívky, rotorem, MR kapalinou a statorem. Pouzdro cívky, stator a rotor jsou vyrobeny z nízkouhlíkové oceli. Spojka byla navržena tak, aby na začátku životního cyklu byla schopna dosáhnout maximální rychlosti 3600 ot/min při proudu menším než 5 A. MR spojka tak byla schopna dosáhnout maximální rychlosti při proudu 5 A, který byl zvolen jako limitní, i po degradaci MR kapaliny, ke které ve spojkce časem dochází. Pouzdro spojky bylo vyrobeno z hliníku.

Testy trvanlivosti spojky byly provedeny ve zkušební buňce o teplotě 65,5 °C. Vstupní hřídel byla připojena k elektromotoru. Test se skládal z 250 dvouhodinových periodicky se opakujících částí. První hodinu je na vstupní hřídel přivedena rychlost 3000 ot/min kromě dvouminutové periody, kdy bylo přivedeno 5000 ot/min. Druhou hodinu byla přivedena rychlost 5000 ot/min. Na výstupní hřídeli byly kontrolovány rychlosti 600, 1600, 2000, 2700 ot/min [12].

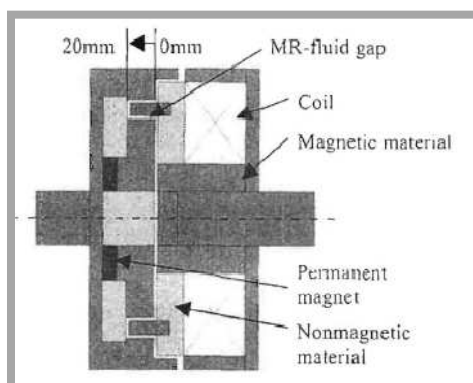
Shrnutí:

- byla částečně popsána konstrukce MR spojky s radiální mezerou pro MR kapalinu
- byl popsán způsob, jakým se testovala MR spojka s ohledem na reálné použití
- byla vyhodnocena trvanlivost náplně

2.3.4 MR spojka s převrácenou přenosovou charakteristikou

Bose, H., et al. Magnetorheological clutch with reverse torque transmission behavior Actuator, *11th international conference of new actuators*, 2008.

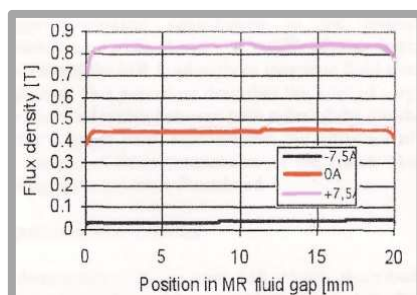
MR spojky standardní konstrukce jsou v rozpojeném stavu, pokud na závity elektromagnetické cívky není přiveden proud. Byla proto vyvinuta spojka, která je schopna přenést krouticí moment až 17 Nm jenom díky permanentnímu magnetu, který je součástí její konstrukce (Obr. 2.12).



Obr. 2.12 Schématický nákres MR spojky Boseho konstrukce [13].

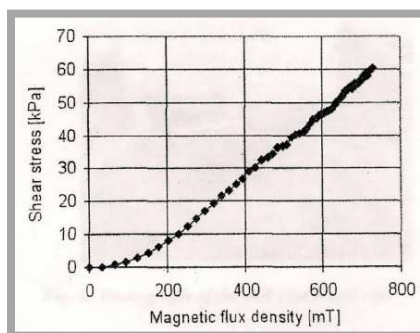
Jedná se o MR spojku s dvojitou radiální mezerou. Výhodou této konstrukce je, že dvě mezery pro MR kapalinu jsou paralelní k ose otáčení. Spojka působí silou na větším obvodu, což umožňuje přenos vyšších krouticích momentů. Další výhodou je malá výška MR mezery (tokového kanálu). Magnetické částice MR kapaliny jsou při vysokých otáčkách vystaveny velkým odstředivým silám. Malá výška MR mezery (tokového kanálu) tak snižuje ztráty energie způsobené zhoršením MR efektu při shlukování částic na jejím vnějším okraji. Vnější průměr spojky je 146 mm, průměr vnitřní válcovité poloviny spojky (po mezeru) je 100 mm. Mezery pro MR kapalinu (tokové kanály) jsou široké 20 mm.

Systém magnetického obvodu sestává z dvou samostatných magnetických obvodů, z nichž jeden obsahuje elektromagnetickou cívku, druhý obsahuje permanentní magnet. Hlavním problémem s touto konfigurací je, že oba obvody jsou ovládány téměř nezávisle. Magnetický tok v MR mezeře je pak superpozicí magnetických toků obou obvodů. Magnetický obvod obsahující permanentní magnet vytváří základní magnetický tok, magnetický obvod s cívkou tento tok modifikuje na vyšší nebo nižší hodnotu. Zda-li je hodnota magnetického toku v MR mezeře vyšší nebo nižší závisí na polaritě proudu přivedeného na závity cívky.



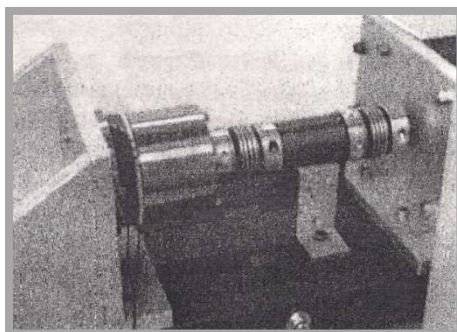
Obr. 2.13 Graf závislosti intenzity magnetického pole na poloměru spojky [13].

MR kapalina použitá ve spojce sestávala z 35 objemových % karbonylového práškového železa a silikonového oleje jako nosné kapaliny. Sedimentační stabilita MR kapaliny byla zvýšena přidáním vhodných aditiv.



Obr. 2.14 Graf závislosti smykového napětí na intenzitě magnetického pole [13].

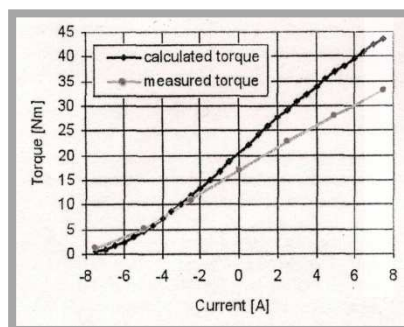
Pro experimentální zkoušku funkčnosti MR spojky byl sestaven improvizovaný testovací obvod (Obr. 2.15). Výstupní hřídel spojky je připojen pevně k základnímu tělesu. Nejsou tedy měřeny výstupní otáčky ze spojky a spojka je testována pro podmínky v jakých pracovala např. MR brzda.



Obr. 2.15 Obrázek testovacího řetězce [13].

Experimentální měření přeneseného krouticího momentu bylo prováděno pro nízké vstupní otáčky, aby byly výsledky porovnatelné s výpočtovými hodnotami. Je-li přiváděn na cívku proud záporné polarity, jsou výsledky experimentu a analytického výpočtu téměř srovnatelné. Při nulovém proudu na cívce je hodnota

skutečně přeneseného krouticího momentu asi o 15% nižší než hodnota vypočítaná. Pro kladnou polaritu proudu na cívce je rozdíl mezi výpočtem a skutečným krouticím momentem ještě vyšší [13].



Obr. 2.16 Obrázek testovacího řetězce [13].

Shrnutí:

- částečně popsána konstrukce MR spojky s permanentním magnetem
- při nulovém příkonu je možno přenášet až 17Nm
- možné přenést až 33 Nm při relativně kompaktní konstrukci
- není uvažována trvanlivost náplně
- není uvažován odvod tepla z tělesa spojky
- při přechodu ze záporné na kladnou polaritu magnetického pole musí být uvažována hysterezní smyčka magnetického syčení (pro permanentní magnet jsou vysoké hodnoty zbytkové magnetizace a velké koercitivní pole)

2.4 Konstrukce MR brzd

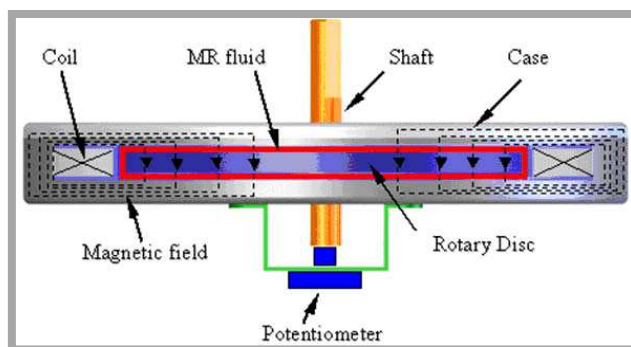
2.4

2.4.1 Vývoj MR brzdy pro hmatovou odezvu virtuální reality

2.4.1

LIU, B, et al. Development of an MR-brake-based haptic device. *Smart materials and structures*. 2006, 15, s. 1960-1966.

Byla vyvinuta MR brzda pro budoucí možné použití jako část hmatové odezvy virtuální reality. Jedná se o brzdu axiální konstrukce se dvěma 1 mm širokými MR mezerami. Brzda má vnější průměr 156 mm. Šířka samotného těla MR brzdy je 20 mm



Obr. 2.17 Řez MR brzdou Liovy konstrukce [14].

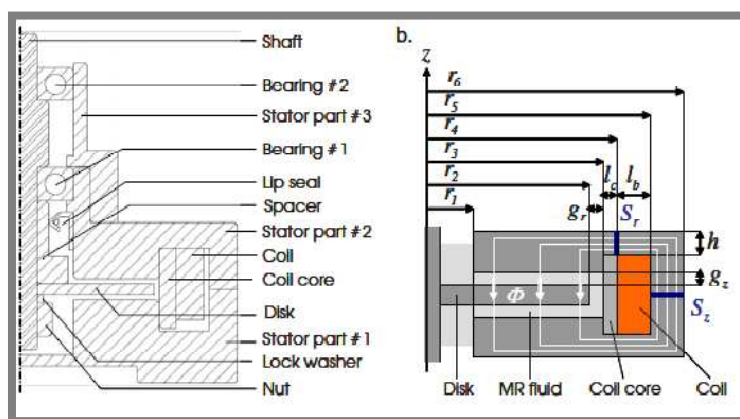
Magnetický obvod je tvořen 95 závitů elektromagnetické cívky, která je navinuta na jádře z magneticky měkké oceli o vnitřním průměru 100 mm. Magnetický obvod a především tvar a rozměry jádra cívky byl optimalizován za pomoci MKP programu COSMOSEMS. Účelem bylo dosáhnoutí saturace magnetického obvodu a MR kapaliny ve stejném okamžiku. Takto sestavená brzda je schopna přenést krouticí moment 7 Nm při proudu 2 A [14].

Závěr:

- Byla popsána konstrukce MR brzdy včetně hlavních rozměrů
- Nebyla zkoušena životnost MR řetězce

2.4.2 MR spojka pro hmatové renderování

DEMERSSEMAN, R., et al. Magnetorheological Brake for Haptic Rendering. *EuroHaptics 2008*. 2008, 5054, s. 941-945.



Obr. 2.18 Řez MR brzdou Demerssemanovy konstrukce [15].

Části statoru 1 a 2 (Obr. 2.18) jsou vyrobeny z oceli AISI1035. Hřídel, podložka, část statoru 3 a jádro cívky jsou vyrobeny z hliníku. V brzdě je použita komerční MR kapalina LORF MRF-132AD. Cívka je navinuta z měděného drátu o průměru 1 mm. Limitní proud pro tento drát je 4 A.

Cílem bylo vyrobit MR brzdou, která by přenesla moment 2 Nm při proudu 4 A a minimálním možném zástavbovém objemu. Aby bylo možné splnit tyto podmínky, je nutné zamezit magnetické saturaci oceli a MR kapaliny. Ve statoru vzniká magnetická saturace nejdříve v průřezech S_r a S_z jelikož jimi prochází maximální magnetický tok. Vnitřní průměr statoru je $r_1 = 9,5\text{mm}$, šířka MR mezery je 1 mm.

Počet závitů cívky závisí na magnetické saturaci oceli a MR kapaliny. Jelikož poměr magnetických permeabilit oceli a MR kapaliny je vysoký:

$$\frac{\mu_{ocel}}{\mu_{MR}} > 200 \quad (33)$$

kde:

μ_{ocel}	H m^{-1}	- permeabilita oceli
μ_{MR}	H m^{-1}	- permeabilita MR kapaliny

Počet závitů cívky můžeme vypočítat podle:

$$nI = \int H dl \approx 2g_z H_{S,MR} \quad (34)$$

kde:

n	1	- počet závitů cívky
I	A	- proud
H	A m ⁻¹	- intenzita magnetického pole
$H_{S,MR}$	A m ⁻¹	- intenzita magnetického pole magnetické (saturace MR mezery)
g_z	mm	- šířka MR mezery

Pro hodnotu intenzity magnetického pole kdy nastane magnetická saturace MR mezery $H_{S,MR} = 130$ kA/m a proud $I = 4$ A bude mít cívka 66 závitů [15].

Shrnutí:

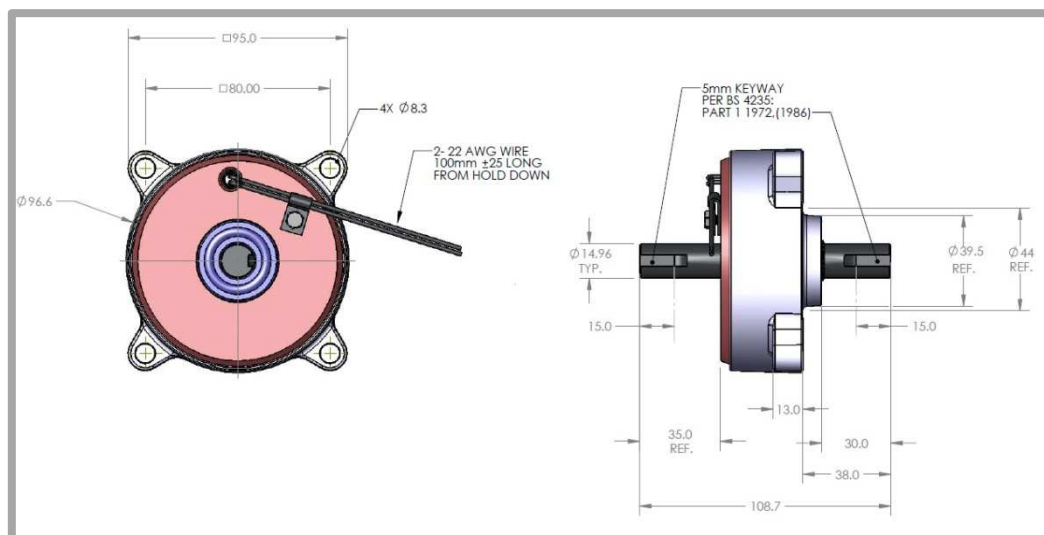
- byla popsána konstrukce kompaktní ($r_6 = 35,9$ mm)MR brzdy
- výkon MR brzdy není vysoký
- byl popsán způsob jak vypočítat počet závitů cívky s ohledem na magnetickou saturaci MR kapaliny
- byl uvažován nízký poměr velikostí permeability oceli a MR kapaliny

2.4.3 Komerční MR brzda

2.4.3

LORD RD-2087-01 Rotary Brake, LORD Data Sheet, 2006.

Jednu z mála komerčně prodávaných MR brzd pro univerzální použití vyvinula společnost LORD. Jedná se o spojku poměrně kompaktních rozměrů (Obr. 2.19). Brzda je dlouhá 108,7 mm včetně vstupní a výstupní hřídele, průměr spojky je 96,6 mm.



Obr. 2.19 Komerční MR brzda LORD [16].

Brzda umožňuje přenést krouticí moment 4 Nm při proudu 1 A. Provozní otáčky, při kterých brzda přenáší tento moment, jsou 120 ot/min. S ohledem na vysokou

životnost brzdy a především její náplně tvořené MR kapalinou LORD je výrobcem omezen proud na maximálně 1,5 A a napětí na 24 V. Nominální odpor vinutí elektromagnetické cívky brzdy je 10 Ω . Časová odezva brzdy je 10 ms [16].

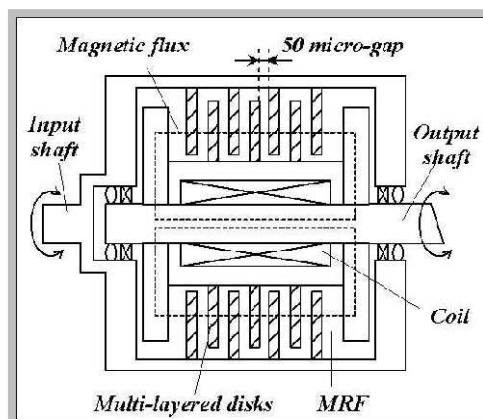
Shrnutí:

- Detailně popsány obálkové rozměry
- Dobrá časová odezva (10 ms)

2.4.4 MR brzda pohonu endoprotézy

KIKUCHI, T, et al. Compact MR fluid clutch device for human-friendly actuator. *Journal of Physics*. 2009, 149, s. 12-59.

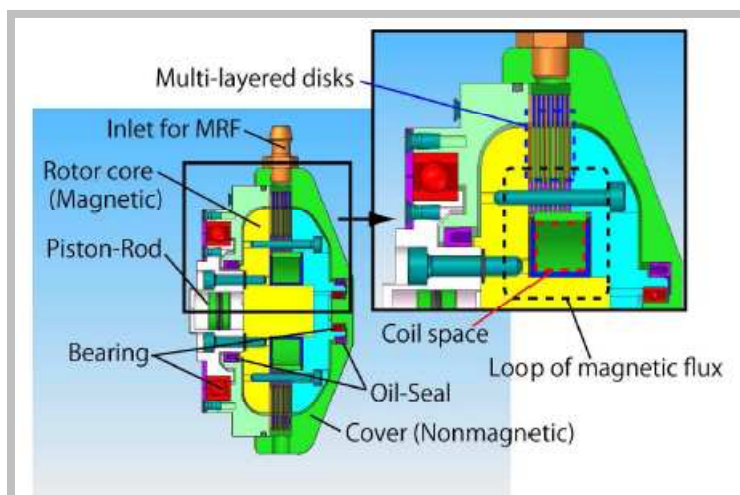
Většina konstrukcí MR spojek s axiální mezerou mají mezery pro MR kapalinu široké v řádech jednotek milimetrů. Takto široká vrstva MR kapaliny pak má vysoký magnetický odpor. Ke generování dostatečně silného magnetického pole je tedy potřeba relativně vysoký proud. Z důvodů snížení energetických nároků a snížení celkových rozměrů byla navržena konstrukce MR spojky, která vyhovuje těmto požadavkům.



Obr. 2.20 Schématický náčrt Kikuchiho konstrukce MR spojky [17].

Na Obr. 2.20 je znázorněn schématický náčrt spojky. Elektromagnetická cívka je natočena okolo výstupní hřídele a generuje magnetické pole. Směr magnetických siločar je na obrázku znázorněn přerušovanou čarou. Disky připevněné ke vstupní a výstupní hřídeli se vzájemně střídají. MR kapalina vyplňuje mezery mezi těmito disky.

MR kapaliny mají velice nízkou permeabilitu (3,5-10), což je více než tisíckrát méně než například ocel, ze které je vyroben magnetický obvod. Z tohoto důvodu mají vrstvy MR kapaliny mezi disky spojky výrazný vliv na magnetický odpor obvodu a způsobují tedy velké energetické ztráty. Za účelem snížení magnetického odporu obvodu byla mezi disky vytvořena mezera o šířce pouze 50 μm . Konstrukci MR spojky předcházela MKP simulace magnetického pole.

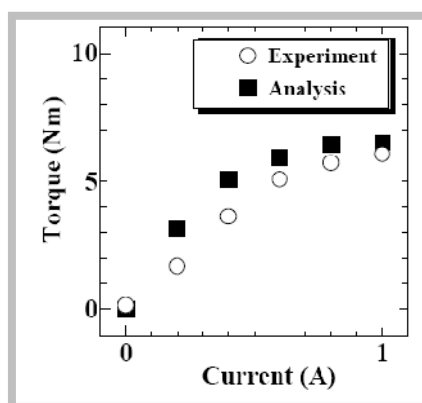


Obr. 2.21 Řez MR spojkou Kikuchiho konstrukce [17].

Spojka má vnější průměr 52 mm, celková šířka spojky je 32mm. Uvnitř spojky se nachází 9 disků, mezi nimi je tedy 18 mezer vyplněných MR kapalinou. Elektromagnetická cívka má 191 závitů. Spojka přenese maximální krouticí moment 6 Nm.

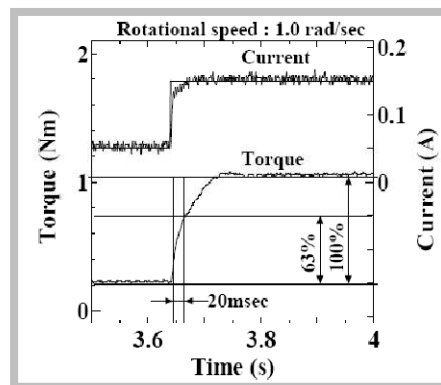
Výpočty a MKP simulace byly ověřeny na reálném zařízení. Vstupní hřídel byla připojena k elektromotoru. K výstupní hřídeli byla připojena 250 mm tyč a na ní byl nepřímo měřen přenášený krouticí moment pomocí siloměru.

V první části experimentu byla ověřena dobrá shoda mezi experimentálními výsledky a početní analýzou.



Obr. 2.22 Graf závislosti krouticího momentu na proudu [17].

V druhé části testu byla ověřována rychlost odezvy MR spojky při skokové změně proudu. Za 20 ms reagovala zvýšením viskozity MR kapaliny a začala přenášet vyšší krouticí moment [17].



Obr. 2.23 Graf znázorňující rychlost odezvy [17].

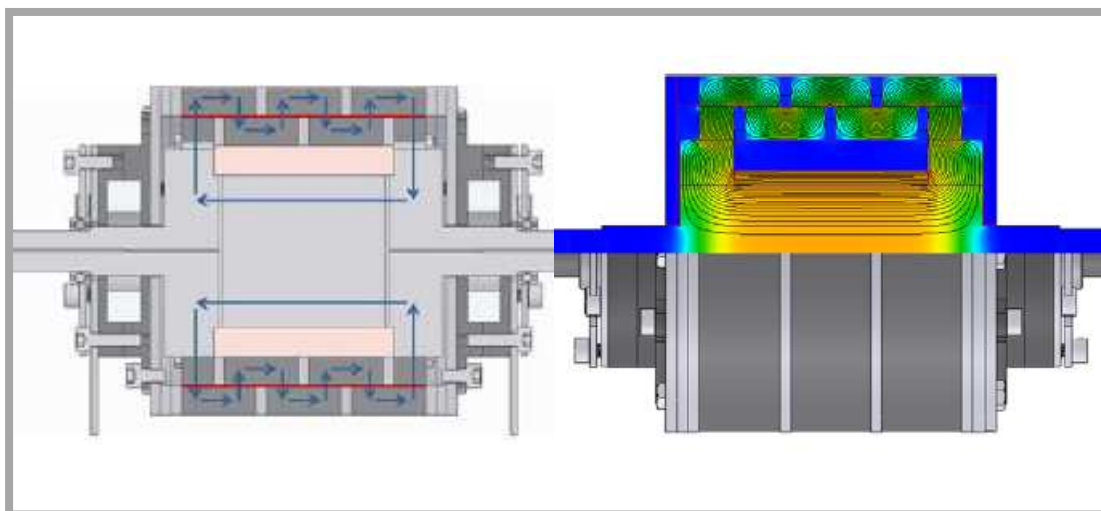
Shrnutí:

- byla částečně popsána inovativní konstrukce MR spojky kompaktních rozměrů
- byl popsán způsob jakým snížit magnetický odpor u MR zařízení
- bylo popsáno zařízení pro testování MR spojky
- nebyl řešen problém s životností
- nebyla řešena tepelná výměna uvnitř MR spojky
- nebyl vyhodnocen vliv úzké mezery pro MR kapalinu na opotřebení součástí. MR kapaliny většinou mají částice o průměru do 10 μm . Sloupec pěti částic řazený ve směru magnetického pole tak 50 μm mezeru zcela ucpe. Při mechanickém namáhání by mohlo dojít k vzepření částic v mezeře a abrazivnímu poškození povrchů součástí.
- pomalá odezva na změnu proudu v závitech cívky (20 ms). Tento problém by mohl být odstraněn snížením počtu závitů cívky.

2.4.5 Radiální MR brzda se serpentinovou trajektorií magnetického toku

SENKAL, D; GUROCAK, H. Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications. *Mechatronics*. 2010, 20, s. 377–383.

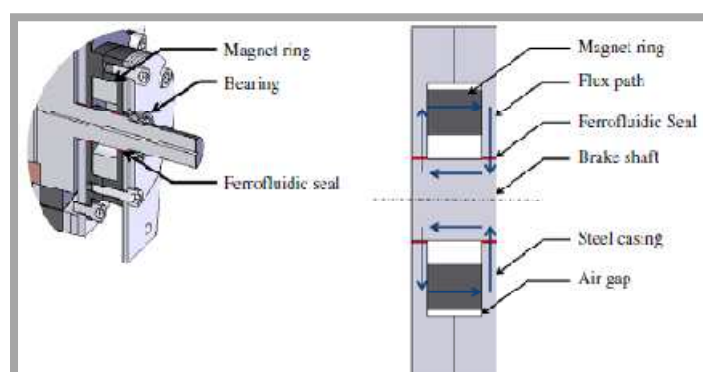
Aby mohlo dojít ke zvýšení přenášeného krouticího momentu a přitom se nezvětšila velikost MR brzdy, je zapotřebí zvýšit plochu, na které je MR kapalina aktivována (vystavena příčnému magnetickému poli). Toho se dá dosáhnout vhodným umístěním magneticky vodivých a nevodivých kroužků, které tak vytvoří serpentínový magnetický obvod (Obr. 2.24).



Obr. 2.24 Řez MR spojkou Senkalovy konstrukce [18].

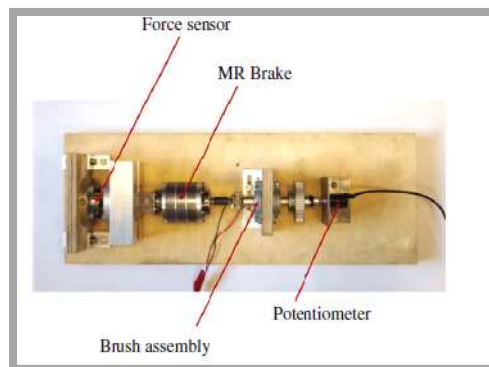
Zdrojem magnetického pole je elektromagnetická cívka tvořena 800 závitů drátu o průměru 0,405 mm. Cívka byla navinuta kolem ocelového rotoru. Brzda je dlouhá 47 mm (délka pouze MR mezery), rotor má průměr 104 mm. Celkový průměr brzdy dosahuje 130 mm. V brzdě byla použita komerční MR kapalina LORD-132LD, která vyplňuje radiální mezeru o šířce 0,25 mm. Brzda přenese maximální krouticí moment 10,83 Nm při 1,5 A.

K utěsnění MR brzdy byl v tomto případě použit netradiční přístup. Většina rotačních MR zařízení používá k zamezení úniku MR kapaliny O-kroužky. Jelikož MR kapalina se na rozdíl od čistého oleje projevuje výrazně vyššími abrazivními vlastnostmi, může časem docházet k poškození o-kroužků a úniku MR kapaliny ze systému. Z tohoto důvodu bylo pro těsnění brzdy vyvinuto ferokapalinové těsnění. Jedná se vlastně o kroužek z permanentně magnetického materiálu, který je nalisován na stator. Magnetické pole vytvořené elektromagnetem tak v místech výstupu hřídeli z těla brzdy aktivuje MR kapalinu, která tak vlastně funguje jako těsnicí materiál. Toto řešení zároveň umožňuje snížení tření v brzdě v neaktivovaném stavu, jelikož v těchto místech nedochází k fyzickému kontaktu dvou součástí.



Obr. 2.25 Ferokapalinové těsnění [18].

Funkčnost MR brzdy byla testována na zařízení vlastní výroby (Obr. 2.26). V praxi byla brzda schopna přenést krouticí moment 10,9 Nm, což je nepatrně vyšší hodnota než která byla získána z teoretického výpočtu [18].



Obr. 2.26 Testovací řetězec MR spojky [18].

Shrnutí:

- byla navržena nová konstrukce MR brzdy
- konstrukce byla detailně popsána i včetně rozměrů a vlastností magnetického obvodu
- byl navržen nový způsob těsnění MR zařízení pomocí ferrokapalinového těsnění
- nebyla řešena teplotní výměna
- neobvykle vysoká proudová hustota ($J=11,6 \text{ A mm}^{-2}$) na závitech elektromagnetické cívky

2.5 Zhodnocení konstrukcí MR spojek

Všechny MR spojky a brzdy lze podle orientace pracovní MR mezery rozdělit na zařízení s axiální a radiální MR mezerou. Pro porovnání různých konstrukcí MR spojek a brzd lze použít například parametr TVR (Torque-to-Volume-Ratio). Tento parametr udává poměr mezi maximálním krouticím momentem a zástavbovým objemem MR zařízení. Všeobecně lze říct, že spojky s axiální MR mezerou jsou oblíbenější konstrukční variantou. Je tomu hlavně díky možnosti přenášet velký krouticí moment při malém zástavbovém objemu (vysoký parametr TVR).

Tabulka 2.2 Porovnání MR spojek a brzd

MR zařízení	Zástavbový objem (cm ³)	Druh spojky	Max. krouticí moment (Nm)	TVR (torque-to- volume- ratio) (Nmm ⁻³)	Objem MR kapaliny (cm ³)
SMITH, MRF fan drive, 2007	X	Radiální	40,00	X	51,20
KAVLICOGLU, A high-torque MRF clutch, 2002	579	Axiální	7,90	13640	2,11
KIKUCHI, Compact MRF clutch device, 2009	67	Axiální	6,00	88290	0,42
BOSE, MR clutch with reverse torque, 2008	2 008	Radiální	33,00	16430	16,10
KAVLICOGLU, A multiplate MRF differential, 2003	2 780	Axiální	244,00	87770	195,40
DEMERSSEMAN, MR brake haptic rendering, 2008	81	Axiální	2,00	24560	2,01
SENKAL, Serpentine MRF brake, 2010	503	Radiální.	10,83	21520	1,92
LORD, RD-2087-01, 2005	320	X	4,00	12 489	X
LIU, MRF brake haptic device, 2010	382	Axiální	7,00	18 311	15,70

Trvanlivost náplně MR spojek a brzd je nejvíce závislá na množství MR kapaliny a jejím efektivním chlazení. Dalšími faktory ovlivňující trvanlivost jsou druh konstrukce, přístup vzduchu ke kapalině a hustota magnetického toku přes pracovní MR mezeru.

3. FORMULACI ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

3.1 Formulace řešeného problému

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh magnetoreologické spojky s parametry:

- **maximální krouticí moment 10 Nm**
- **maximální vstupní otáčky 6000 ot/min**
- **rozsah regulace otáček 0-6000 ot/min**
- životnost MR uzlu 100 hod při 3500 ot/min
- možnost demonstrativního rozebrání pro výukové účely
- **možnost měření teploty uvnitř MR ventilu**
- **snadná výměna MR kapaliny**
- možnost měření hustoty magnetického pole uvnitř MR ventilu pomocí sond dostupných na ÚK

Z důvodu budoucího požití MR spojky pro testování životnosti MR kapalin může dojít k určitému odklonu od zadání.

3.2 Technická analýza

Vyvíjená MR spojka bude mít charakter experimentálního zařízení (první v ČR) pro ověření principu fungování MR spojek a trvanlivostní testy MR kapalin. Bude se tedy jednat o jedinečný prototyp, čemuž bude odpovídat i přístup ke konstrukci a volené postupy a materiály. Hlavními hledisky hodnocení úspěšnosti konstrukce bude bezvadná funkčnost zařízení a ekonomická náročnost výroby. Konstrukci budou dále ovlivňovat možnost měření hustoty magnetického toku uvnitř pracovní oblasti spojky a další požadavky dle kapitoly 3.1.

3.3 Vývojová analýza

V první fázi bude zpracována rešerše týkající se konstrukce MR spojek a výpočtů s MR kapalinami. Dále pak bude počítán magnetický obvod s ohledem na použitou MR kapalinu a magnetické vlastnosti materiálů.

V druhé fázi bude následovat samotná konstrukce MR spojky, zpracování technické dokumentace a výroba.

Ve třetí fázi bude experimentálně otestována funkčnost některých konstrukčních uzlů MR spojky.

Ve čtvrté fázi dojde k otestování MR spojky a zpracování výsledků měření. Z výsledků měření a experimentů budou vyvozeny patřičné závěry.

4. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

4

Primárním cílem práce je zkonstruovat, vyrobit, sestavit a předběžně otestovat MR spojku, která by splňovala parametry dle zadání (kapitola 3.1). Sekundárním cílem je ověřit efektivitu zvolených konstrukčních postupů a experimentálně ověřit fungování vybraných konstrukčních uzlů. Bude se jednat především o experimentální ověření funkčnosti magnetického těsnění a praktické ověření rozložení magnetické indukce uvnitř pracovního prostoru spojky. Tercialním cílem je zkonstruovat, připojovací a testovací řetězec pro měření životnosti MR kapalin. Tento řetězec by měl umožňovat měření vstupních a výstupních otáček a výstupního momentu.

5. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Vypracování diplomové práce je rozděleno podle logické a časové posloupnosti do několika etap.

Rešerše

Nejprve budou vyhledány informace o principu fungování zařízení využívající MR kapaliny. Dále pak budou nalezeny informace o již realizovaných konstrukcích rotačních MR zařízení (spojek a brzd). Na základě informací získaných z rešerše bude učiněn závěr o nejvhodnější konstrukční variantě MR spojky a jejích částí (druh MR spojky, počet lamel, tloušťka MR mezery).

Výpočet magnetického obvodu

Bude navržen magnetický obvod tak, aby výstup spojky odpovídal zadaným parametrům. Z výsledků výpočtu bude určena optimální tloušťka lamel spojky, počet závitů cívky a proud na cívce.

Konstrukce

Bude vytvořen 3D model několika různých vývojových variant MR spojek. Z možností bude vybrán nejvhodnější typ. K vybrané konstrukci bude vytvořena výkresová dokumentace.

Výroba

V dílně ÚK budou vyrobeny součásti MR spojky a po smontování sestavy proběhnou dokončovací operace

Dokončení

Budou experimentálně ověřeny vybrané parametry a konstrukční uzly konstrukce (rozložení magnetické indukce po průřezu spojky, zkouška těsnosti).

Montáž

Po dokončovacích operacích a experimentech bude spojka sestavena, naplněna a připravena pro měření momentové charakteristiky.

Testování

Bude otestována funkčnost MR spojky a z výsledků testu budou vyvozeny potřebné závěry.

6. NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

6

Spojka s axiální MR mezerou je pro tento případ podle výsledků rešerše nejvhodnější konstrukční varianta. U těchto spojek je možné dosahovat vysokých krouticích momentů při zachování relativně kompaktní velikosti. Jelikož je diplomová práce určená k výzkumné a výukové činnosti ÚK, je navíc u této konstrukční varianty kladen důraz na dostatečně zřetelné fungování jednotlivých částí i celku.

Konstrukční varianty různých spojek s axiální MR mezerou se dále liší například počtem rotorových a statorových lamel a polohou elektromagnetické cívky. Cívka může být navinuta na vnějším obvodu pracovního prostoru nebo na hřídeli. Dalším aspektem, který ovlivňuje konstrukci MR spojky, je mechanická charakteristika. V rešeršní části (Kapitola 2) jsou popsány konstrukce jak s pevnou tak i pohyblivou statorovou částí. Konstrukční varianty s pevnou statorovou částí (např. Kapitola 2.2.3) jsou výhodnější s ohledem na přenos elektrického proudu na závity cívky. Není zde potřeba používat kartáčky (uhlíky) a sběrací kroužky. Konstrukční varianta s pohyblivou statorovou částí (např. Kapitola 2.3.3) naopak lépe využívá magnetický tok cívky, jelikož není v konstrukci třeba vytvořit vzduchovou mezeru mezi pohyblivou a klidovou částí statoru. Nevýhodou této konstrukční varianty je nutnost přenosu elektrického proudu přes kartáčky.

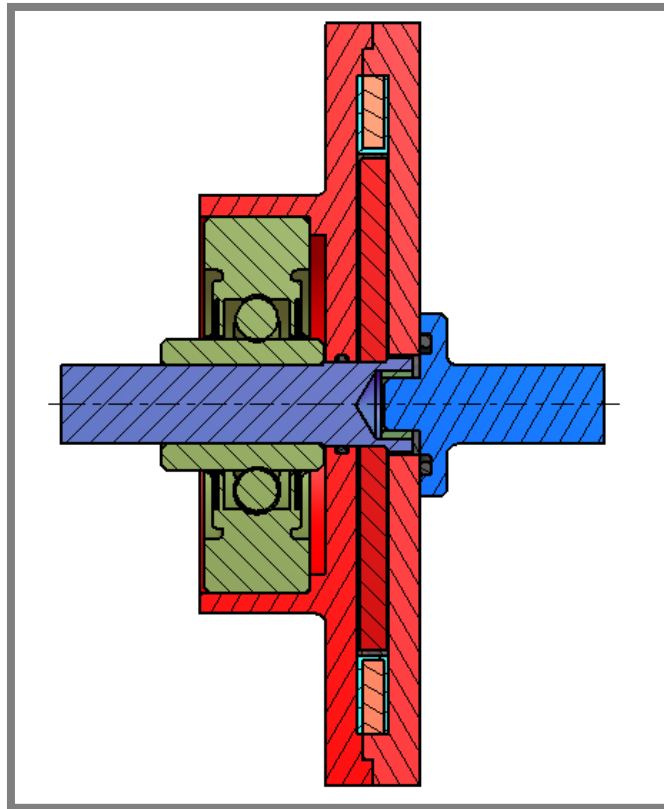
POZNÁMKA

Ve všech původních obrázcích kapitol 6, 7 a 8 jsou součásti vyrobené z feromagnetických materiálů označeny odstíny červené barvy, součásti z paramagnetických a diamagnetických materiálů odstíny modré barvy, permanentní magnety fialovou barvou, ložiska odstíny zelené barvy, těsnění černou barvou, MR kapalina šedo-černou barvou a spojovací materiál barvou ocelově šedou.

6.1 MR spojka s jednou rotorovou lamelou

6.1

Jako první konstrukční varianta MR spojky s axiální pracovní mezerou byla zvolena spojka s jednou rotorovou lamelou. Jedná se o spojku s pohyblivou statorovou částí, statorové lamely tedy plní i funkci vnějšího obalu.



Obr. 6.1 Řez MR spojkou s jednou rotorovou lamelou.

Lamely, statorové i rotorové, budou vyrobeny z feromagnetického materiálu (oceli). Vstupní hřídel, výstupní hřídel a rámeček cívky jsou vyrobeny z materiálů paramagnetických (hliníkové slitiny) a diamagnetických (plasty). Materiály jednotlivých součástí jsou takto voleny, aby byl magnetický tok veden především příčným směrem skrz MR mezery a vyvolával zde MR efekt.

Pokud má spojka pouze jednu rotorovou lamelu tak magnetický tok musí projít přes dvě MR mezery a jednu ocelovou lamelu. Výpočet ověřující, zda MR spojka přenese daný krouticí moment, vyžaduje volbu několika parametrů. Jedná se především o rozměry lamel, šířku MR mezery a počet závitů elektromagnetické cívky.

$$D_0 = 33 \text{ mm}$$

$$D_1 = 94 \text{ mm}$$

$$R_0 = \frac{D_0}{2} = \frac{33 \text{ mm}}{2} = 16,5 \text{ mm} \quad (35)$$

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{94 \text{ mm}}{2} = 47 \text{ mm} \quad (36)$$

kde:

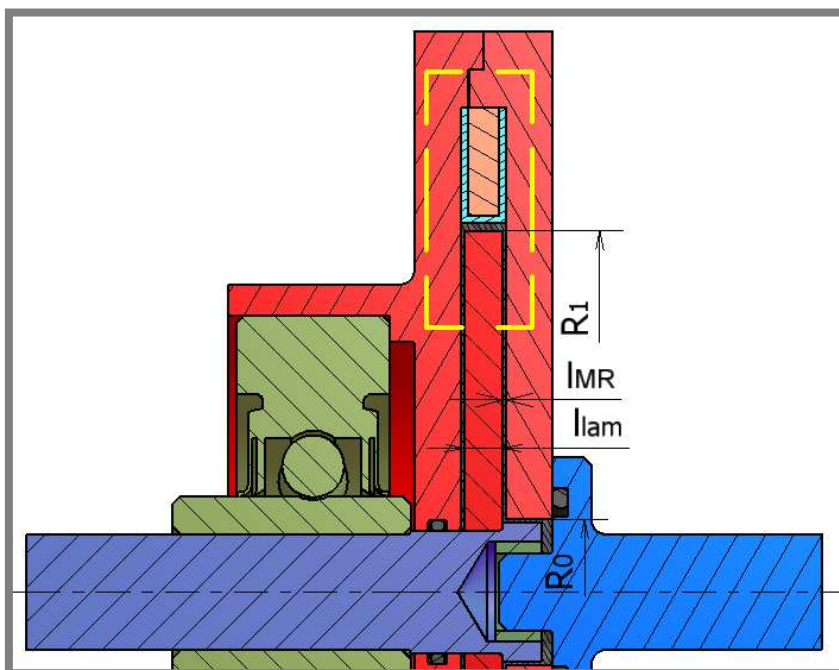
D_0	m	- vnitřní průměr pracovní MR mezery
D_1	m	- vnější průměr pracovní MR mezery
R_0	m	- vnitřní poloměr pracovní MR mezery
R_1	m	- vnější poloměr pracovní MR mezery

Plocha, která je zodpovědná za přenos krouticího momentu, je tedy mezikruží o obsahu:

$$S = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_0^2) = \frac{\pi}{4}(94^2 \text{ mm}^2 - 33^2 \text{ mm}^2) = 6,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (37)$$

kde:

S m^2 - obsah plochy mezikruží pracovní MR mezery



6.2 Detail řezu MR spojkou sjednou roetrovou lamelou.

Krouticí moment je přenášen pomocí dvou MR pracovních mezer. Každá z nich tedy přenáší přesně polovinu krouticího momentu daného zadáním.

$$M_{MR} = \frac{M_{celk}}{2} = \frac{10 \text{ Nm}}{2} = 5 \text{ Nm} \quad (38)$$

kde:

M_{celk} Nm - celkový krouticí moment (ze zadání)
 M_{MR} Nm - krouticí moment na MR mezeru

Pro výpočet proudu, který je potřeba přivést na závity cívky, aby bylo možno přenést 10 Nm, je nejdříve zapotřebí vypočítat magnetický odpor železné lamely a MR mezer. Výpočet magnetického odporu ocelové lamely není složitý, jelikož pro magnetickou permeabilitu oceli byla zvolena v tomto případě konstantní hodnota. I přes toto zjednodušení je výpočet nadále dostatečně přesný.

$$R_{Mlam} = \frac{l_{lam}}{\mu_0 \mu_{Ocel} S} = \frac{5 \text{ mm}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \cdot 2300 \cdot 6,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 284,32 \text{ H}^{-1} \quad (39)$$

kde:

R_{Mlam}	H^{-1}	- magnetický odpor ocelové lamely
l_{lam}	m	- šířka lamely (volený rozměr)
μ_0	Hm^{-1}	- permeabilita vakua
μ_{Ocel}	1	- relativní permeabilita oceli

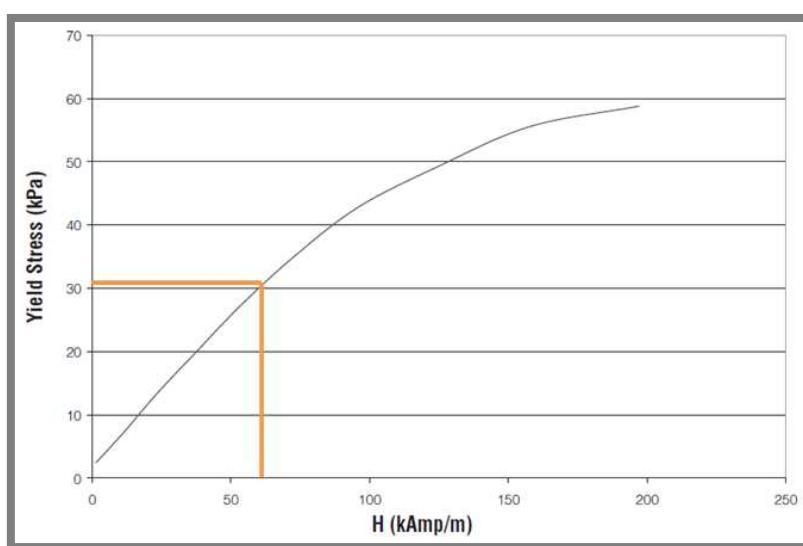
Výpočet magnetického odporu MR mezery nelze zjednodušit jako v předchozím případě. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, MR kapalina se chová podle Binghamského modelu. To znamená, že má proměnnou mez kluzu. Pro získání relativní permeability MR kapaliny je tedy nutno vycházet z Binghamského vztahu vyjádřeného pro MR kapalinu pracující v MR spojení s axiální pracovní mezerou (Kapitola 2.2.1).

$$\tau_y = \frac{2M_{MR}R_1}{\pi(R_1^4 - R_0^4)} = \frac{2 \cdot 5Nm \cdot 0,047m}{\pi \cdot (0,047^4 m^4 - 0,0165^4 m^4)} = 3,11 \cdot 10^4 Pa \quad (40)$$

kde:

τ_y	Pa	- smykové napětí v MR kapalině
----------	----	--------------------------------

Velikost smykového napětí závisí na intenzitě magnetického pole H . Závislost je určena experimentálně a vyjádřena pomocí grafu (Obr. 6.3). Z grafu je tedy možné vyčíst velikost intenzity magnetického pole.



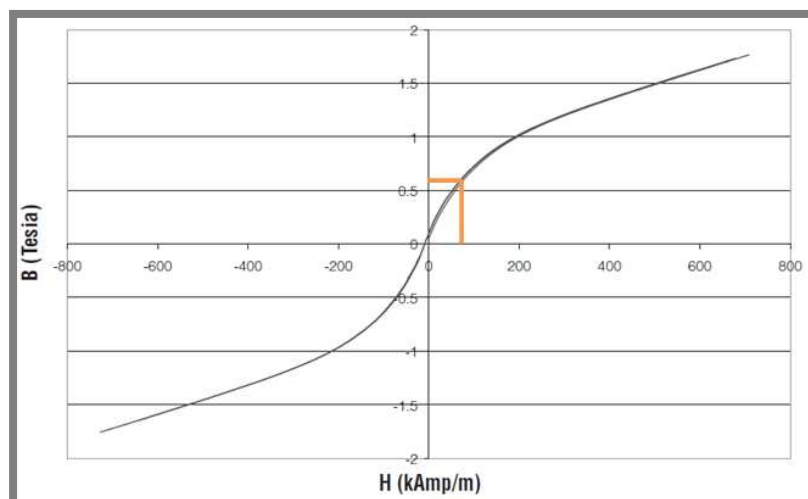
Obr. 6.3 Graf závislosti smykového napětí na intenzitě magnetického pole pro MR kapalinu LORD 140 CG

$$H = 63 kA m^{-1}$$

kde:

H	$A m^{-1}$	- intenzita magnetického pole
-----	------------	-------------------------------

Z B-H křivky je poté možno odečíst magnetickou indukci B a následně, po zvolení šířky MR mezery, vypočítat permeabilitu MR kapaliny a magnetický odpor MR mezery.



Obr. 6.3 B-H křivka MR kapaliny LORD 140 CG.

$$B = 0,65 T$$

$$\mu_{MR} = \frac{B}{H\mu_0} = \frac{0,65 T}{63 kA m^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}} = 8,21 \quad (41)$$

$$R_{MMR} = \frac{l_{MR}}{\mu_0 \mu_{MR} S} = \frac{0,5 mm}{4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1} \cdot 8,21 \cdot 6,08 \cdot 10^{-3} m^2} = 7,97 \cdot 10^3 H^{-1} \quad (42)$$

kde:

B	T	- magnetická indukce
R_{MMR}	H^{-1}	- magnetický odpor MR mezery
l_{MR}	m	- šířka MR mezery

Celkový magnetický odpor lze získat superpozicí magnetických odporů jednotlivých částí, kterými magnetický tok protéká.

$$R_M = 2R_{MR} + R_{Mlam} = 2 \cdot 7,97 \cdot 10^3 H^{-1} + 284,32 H^{-1} = 1,62 \cdot 10^4 H^{-1} \quad (43)$$

kde:

R_M	H^{-1}	celkový magnetický odpor
-------	----------	--------------------------

Proud na závitech cívky pracující spojky se vypočítá pomocí již zmíněného magnetického toku a celkového magnetického odporu.

$$\Phi = B \cdot S = 0,65 T \cdot 6,08 \cdot 10^{-3} m^2 = 3,96 \cdot 10^{-3} Wb \quad (44)$$

$$z = 40$$

$$I = \frac{R_M \cdot \Phi}{z} = \frac{1,62 \cdot 10^4 H^{-1} \cdot 3,96 \cdot 10^{-3} Wb}{40} = 1,60 A \quad (45)$$

kde:

Φ	Wb	- magnetický tok
I	A	- proud
z	1	- počet závitů cívky

Před ukončením výpočtu je ještě nutné si uvědomit, že tento výpočet je zjednodušený a v jeho průběhu bylo zanedbáno několik faktorů. Hlavním faktorem, který ovlivní výpočet je nehomogenní magnetické pole uvnitř spojky. Dalším zanedbaným faktorem je magnetický odpor vnější části magnetického obvodu. Vzhledem k použitým materiálům (feromagnetické oceli) by nemělo mít toto zjednodušení výrazný vliv na výsledek.

6.2 MR spojka se dvěma rotorovými lamelami

Konstrukční návrh spojky s dvěma rotorovými lamelami je velice podobný předchozímu konstrukčnímu návrhu. Tento konstrukční návrh je z hlediska splnění všech požadavků zadání vhodnější než varianta s jednou lamelou.

Magnetický tok v tomto konstrukčním návrhu prochází třemi ocelovými lamelami a čtyřmi MR mezerami. Výpočet je v podstatě stejný jako v předchozím případě.

$$D_0 = 33mm$$

$$D_1 = 94mm$$

$$R_0 = \frac{D_0}{2} = \frac{33mm}{2} = 16,5mm \quad (46)$$

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{94mm}{2} = 47mm \quad (47)$$

kde:

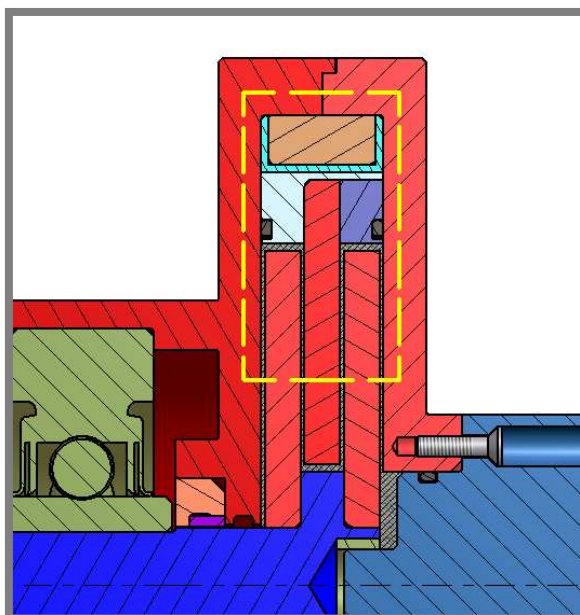
D_0	m	- vnitřní průměr pracovní MR mezery
D_1	m	- vnější průměr pracovní MR mezery
R_0	m	- vnitřní poloměr pracovní MR mezery
R_1	m	- vnější poloměr pracovní MR mezery

Plocha, která je zodpovědná za přenos krouticího momentu, je tedy mezikružím o obsahu:

$$S = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_0^2) = \frac{\pi}{4} (94^2 mm^2 - 33^2 mm^2) = 6,08 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (48)$$

kde:

S	m^2	- obsah plochy mezikružím pracovní MR mezery
-----	-------	--



Obr. 6.4 Magnetická smyčka pracovní oblastí.

Magnetický tok v tomto případě prochází čtyřmi MR mezerami. Moment přenesený jednou MR mezerou je tedy roven čtvrtině celkového krouticího momentu.

$$M_{MR} = \frac{M_{celk}}{4} = \frac{10 \text{ Nm}}{4} = 2,5 \text{ Nm} \quad (49)$$

kde:

M_{celk}	Nm	- celkový krouticí moment (ze zadání)
M_{MR}	Nm	- krouticí moment na MR mezeru

Magnetický odpor ocelové lamely se vypočítá podle rovnice (41) podobně jako u první konstrukční varianty.

$$R_{Mlam} = \frac{l_{lam}}{\mu_0 \cdot \mu_{Ocel} \cdot S} = \frac{5 \text{ mm}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \cdot 2300 \cdot 6,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} \quad (50)$$

$$= 284,32 \text{ H}^{-1}$$

kde:

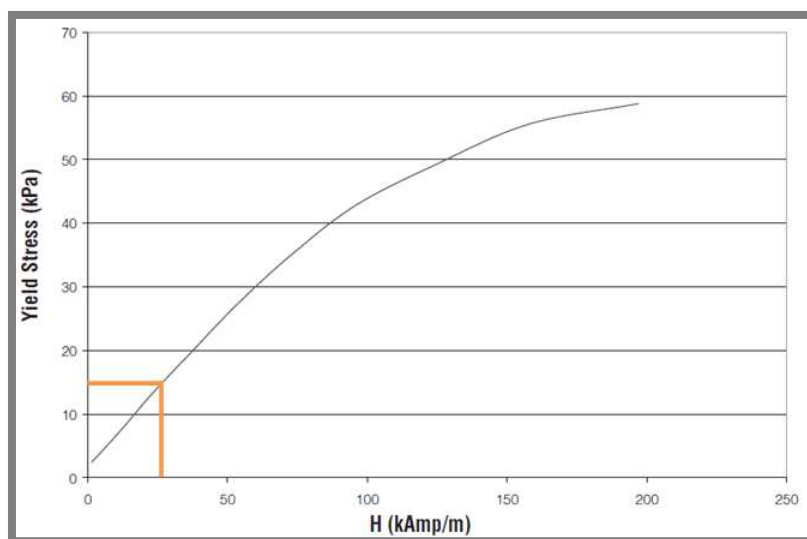
R_{Mlam}	H^{-1}	- magnetický odpor ocelové lamely
l_{lam}	m	- šířka lamely (volený rozměr)
μ_0	Hm^{-1}	- permeabilita vakua
μ_{Ocel}	1	- relativní permeabilita oceli

$$\tau_y = \frac{2M_{MR}R_1}{\pi(R_1^4 - R_0^4)} = \frac{2 \cdot 2,5 \text{ Nm} \cdot 0,047 \text{ m}}{\pi \cdot (47^4 \text{ mm}^2 - 16,5^4 \text{ mm}^4)} = 1,56 \cdot 10^4 \text{ Pa} \quad (51)$$

kde:

τ_y	Pa	- mez kluzu MR kapaliny
----------	----	-------------------------

Velikost intenzity magnetického pole se zjistí z grafu závislosti smykového napětí na intenzitě magnetického pole.



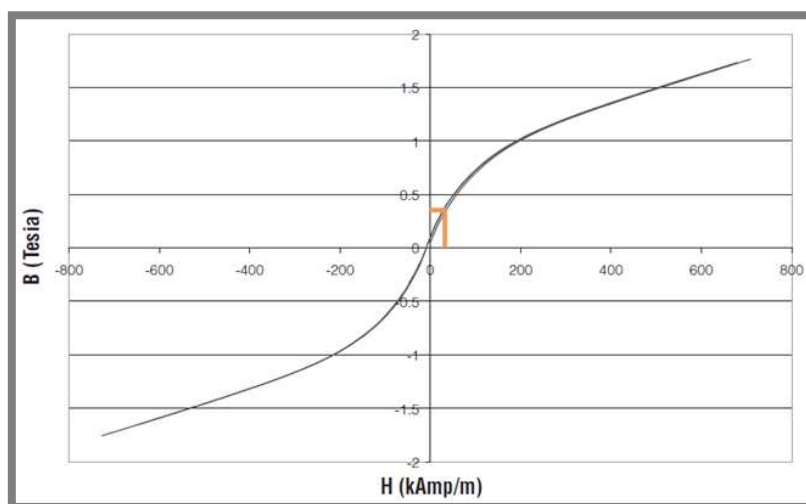
Obr. 6.5 Graf závislosti smykového napětí na intenzitě magnetického pole pro MR kapalinu LORD 140 CG

$$H = 30 \text{ kA m}^{-1}$$

kde:

H A m^{-1} - intenzita magnetického pole

Magnetickou indukci se poté vypočítá z B-H křivky pro MR kapalinu.



Obr. 6.6 B-H křivka MR kapaliny LORD 140 CG.

$$B = 0,35 \text{ T}$$

$$\mu_{MR} = \frac{B}{H \cdot \mu_0} = \frac{0,35 \text{ T}}{48 \text{ kA m}^{-1} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}} = 9,28 \quad (52)$$

$$R_{MMR} = \frac{l_{MR}}{\mu_0 \cdot \mu_{MR} \cdot S} = \frac{0,5 \text{ mm}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \cdot 9,28 \cdot 6,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 7,04 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (53)$$

kde:

B	T	- magnetická indukce
R_{MMR}	H^{-1}	- magnetický odpor MR mezery
l_{MR}	mm	- šířka MR mezery

Superpozicí jednotlivých částí magnetických odporů získáme celkový magnetický odpor.

$$R_M = 4 \cdot R_{MR} + 3 \cdot R_{Mlam} = 4 \cdot 7,04 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} + 3 \cdot 283,32 \text{ H}^{-1} = 2,90 \cdot 10^4 \text{ H}^{-1} \quad (54)$$

kde:

R_M	H^{-1}	- celkový magnetický odpor
-------	-----------------	----------------------------

Z magnetického toku a celkového magnetického odporu se poté vypočítá proud v cívce.

$$\Phi = B \cdot S = 0,35 \text{ T} \cdot 6,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (55)$$

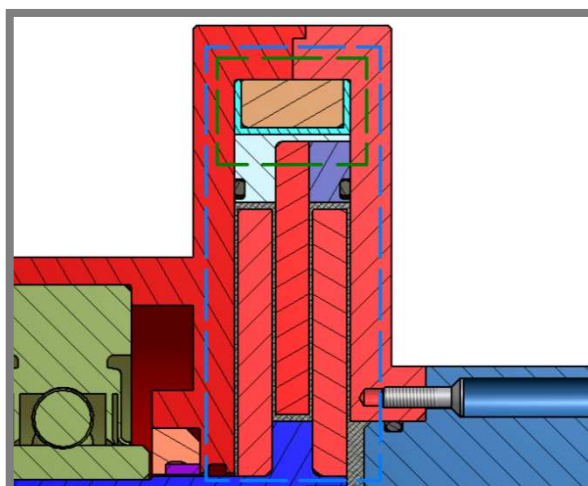
$$z = 65$$

$$I = \frac{R_M \cdot \Phi}{z} = \frac{2,90 \cdot 10^4 \text{ H}^{-1} \cdot 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{65} = 0,95 \text{ A} \quad (56)$$

kde:

Φ	Wb	- magnetický tok
I	A	- proud
z	1	- počet závitů cívky

Funkčnost MR spojky ovlivňuje především distribuce magnetického toku v průřezu spojky. Důležité tedy je zkontrolovat ostatní magnetické smyčky, po kterých může magnetický tok spojkou procházet.



Obr. 6.7 Magnetické smyčky průřezem MR spojky

První smyčkou, po které může magnetický tok procházet, je u této konstrukční nad pracovním prostorem s MR kapalinou (zelená smyčka). V tomto případě pak magnetický tok prochází přes dvě 6 mm silné vrstvy z hliníkové slitiny a jednu 5 mm ocelovou vrstvu (statorová lamela).

$$D_{zelená0} = 96mm$$

$$D_{zelená1} = 114mm$$

$$g_{Al} = 6mm$$

$$g_{Ocel} = 5mm$$

$$\mu_{Al} = 1$$

$$S_{zelená} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{zelená1}^2 - D_{zelená0}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (114^2 mm^2 - 96^2 mm^2) = 2,97 \cdot 10^3 mm^2 \quad (57)$$

$$R_{MAI} = \frac{g_{Al}}{\mu_0 \cdot \mu_{Al} \cdot S_{zelená}} = \frac{6mm}{4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1} \cdot 1 \cdot 2,97 \cdot 10^3 mm^2} = 1,61 \cdot 10^6 H^{-1} \quad (58)$$

$$R_{MOcel} = \frac{g_{Ocel}}{\mu_0 \cdot \mu_{Ocel} \cdot S_{horní}} = \frac{5mm}{4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1} \cdot 2300 \cdot 2,97 \cdot 10^3 mm^2} = 582,71 H^{-1} \quad (59)$$

$$R_{Mzelená} = 2 \cdot R_{MAI} + R_{MOcel} = 2 \cdot 1,61 \cdot 10^6 H^{-1} + 582,71 H^{-1} = 3,22 \cdot 10^6 H^{-1} \quad (60)$$

kde:

$D_{zelená0}$	mm	- malý průměr příčné části zelené smyčky
$D_{zelená0}$	mm	- velký průměr příčné části zelené smyčky
g_{Al}	mm	- šířka hliníkové části
μ_{Al}	1	- relativní permeabilita hliníku
$S_{zelená}$	mm ²	- plocha průřezu oblasti zelené smyčky
R_{MAI}	H ⁻¹	- magnetický odpor hliníkové součásti
R_{MOcel}	H ⁻¹	- magnetický odpor ocelové součásti
$R_{Mzelená}$	H ⁻¹	- magnetický odpor příčné části zelené smyčky

Druhá smyčka, kterou může magnetický tok procházet, vede podélně skrz rotorovou hřídel (modrá smyčka).

$$g_{hridel} = 17 \text{ mm}$$

$$D_{hridel} = 16 \text{ mm}$$

$$S_{hridel} = \frac{\pi \cdot D_{hridel}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 16^2 \text{ mm}}{4} = 706,86 \text{ mm}^2 \quad (61)$$

$$R_{Mmodrá} = \frac{g_{hridel}}{\mu_0 \cdot \mu_{Al} \cdot S_{hridel}} = \frac{5 \text{ mm}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \cdot 1 \cdot 706,86 \text{ mm}^2} = 1,91 \cdot 10^7 \text{ H}^{-1} \quad (62)$$

kde:

g_{hridel}	mm	- šířka části hřídele
D_{hridel}	mm	- průměr hřídele
S_{hridel}	mm ²	- plocha průřezu hřídele
$R_{Mmodrá}$	H ⁻¹	- magnetický odpor příčné části modré smyčky

Magnetické odpory smyček procházejících nad a pod pracovním prostorem s MR kapalinou jsou řádově vyšší, než pokud tok prochází přes pracovní prostor. Tímto je ověřeno, že použité materiály a samotná konstrukce zajišťují efektivní využití vytvořeného magnetického pole.

6.3 Výběr optimálního řešení

Pro případ tohoto zadání bylo vybráno řešení s dvěma rotorovými lamelami. Tato volba má hned několik důvodů. Prvním z důvodů bylo zrychlit odezvu MR spojky. Toho se dá efektivně docílit především zvýšením pracovní plochy MR mezer. Větší kontaktní plocha dovoluje menší prokluz a tedy i celková časová odezva se zlepší. Druhým důvodem je zajištění funkce MR spojky. Během výpočtu magnetického obvodu bylo uvažováno, že hustota magnetického pole je uvnitř cívky konstantní. Ve skutečnosti však magnetické pole se vzdáleností od cívky směrem k jejímu středu klesá. Z tohoto důvodu byla konstrukce rozumně naddimenzována, aby nemuselo docházet ke zbytečnému zatěžování cívky vysokým proudem a tak zahřívání celé

konstrukce. Skutečná závislost hustoty magnetického pole na vzdálenosti od středu cívky bude experimentálně naměřena pomocí magnetometru.

7. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

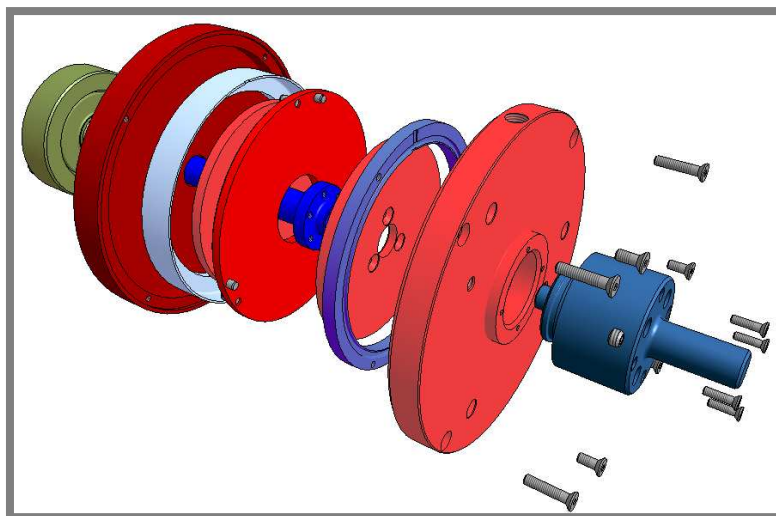
7

Konstrukční návrh začal zvolením typu konstrukce MR spojky. Jak již bylo uvedeno v kapitole 6, byla vybrána konstrukční varianta MR spojky s axiální MR mezerou s dvěma rotorovými lamelami a pohyblivou statorovou částí. V konstrukčním řešení došlo k odklonu od zadání, který byl způsobem změnou cílového použití z demonstračního zařízení na zařízení pro trvanlivostní testy ve smykovém zatěžovacím módu.

Ve většině vědeckých článků, popisujících konstrukci rotačních MR zařízení, se autoři nezabývají trvanlivostí náplně, a faktory které ji ovlivňují. Jedná se především o vliv teploty, množství náplně a mechanického zatížení na životnost MR kapaliny. MR kapalina, jakožto pracovní medium, odpovídá za životnost a správné fungování celého zařízení. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o změně cílového požití spojky na zařízení pro testování životnosti MR kapaliny.

MR spojka byla původně určena jako experimentální zařízení, které by ověřovalo správnost zvolených konstrukčních postupů popsanych v rešeršní části (kapitola 2). Nově je MR spojka určena pro testování životnosti MR kapaliny s možností odvození závislosti mezi únavou MR kapaliny, pracovní teplotou náplně a mírou mechanického namáhání kapaliny.

Na konstrukční změny a částečné odklony od zadání je upozorněno v jednotlivých částech kapitoly 7. Jedná se především o změnu objemu náplně spojky a velikost výstupních otáček.



Obr. 7.1 Rozpad sestavy MR spojky .

7.1 MR mezera

7.1

Z výpočtu magnetického obvodu (kapitola 6.2) vyplývá, že návrh pracovní části se bude skládat ze dvou rotorových lamel, tří statorových lamel (dvě krajní lamely navíc plní zároveň funkci vnějšího obalu). Mezi lamelami tak vznikají čtyři MR mezery. Z rešerše (kapitola 2) vyplývá, že nejčastěji volená šířka MR mezery je 1 mm. V nejefektivnější konstrukci (konstrukci s nejvyšším parametrem TVR, kapitola 2.4.4) byla šířka MR mezery zvolena na 50 μm . MR kapaliny mají všeobecně poměrně vysoký magnetický odpor (více než 200krát větší než

feromagnetická ocel). Z tohoto důvodu je výhodné v konstrukci použít co nejméně širokou pracovní mezeru a minimalizovat tak energetické nároky zařízení. Z důvodů výrobní náročnosti, možnosti vymezení pracovních vůlí, kvality povrchu a ceny, je vhodnější v konstrukci použít větší pracovní mezeru. Nebudou tak nastávat problémy s vymezením funkčních vůlí vlivem teplotních dilatací a výrobních nepřesností. Šířka MR mezery 0,5 mm, která byla pro tuto konstrukci zvolena, je tedy jistým kompromisem na základě konstrukčních a funkčních předpokladů MR spojky.

Trvanlivost náplně je v zadání zvolená na 1000 hod při 3500 ot/min. Aby bylo možné dosáhnout této trvanlivosti, je nutné, aby spojka obsahovala určité množství MR kapaliny. V kapitole 2.2.2 byl zmíněn parametr LDE, který částečně popisuje vztah mezi životností MR kapaliny a objemem náplně. Pro použitou MR kapalinu LORD MRF 140 CG se hodnota LDE pohybuje v rozmezí $10^5 - 10^7 \text{ J/cm}^3$. Objem náplně tedy musí být dostatečný, aby se LDE pohybovalo v řádech 10^7 J/cm^3 .

$$LDE = 9,99 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}$$

$$n = 3500 \frac{1}{\text{min}} = 58,33 \frac{1}{\text{s}}$$

$$M = 10 \text{ Nm}$$

$$\omega = 2 \pi n = 2 \pi 58,33 \frac{1}{\text{s}} = 366,52 \frac{1}{\text{s}} \quad (63)$$

$$P = M \omega = 10 \text{ Nm} \cdot 366,52 \frac{1}{\text{s}} = 3,67 \cdot 10^3 \text{ W} \quad (64)$$

$$t_0 = 0 \text{ h}$$

$$t_1 = 1000 \text{ h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ s}$$

$$\Delta t = t_1 - t_0 = 1000 \text{ h} - 0 \text{ h} = 1000 \text{ h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ s} \quad (65)$$

$$LDE = \frac{1}{V} \int_{t_0}^{t_1} P dt = \frac{P \Delta t}{V} \quad (66)$$

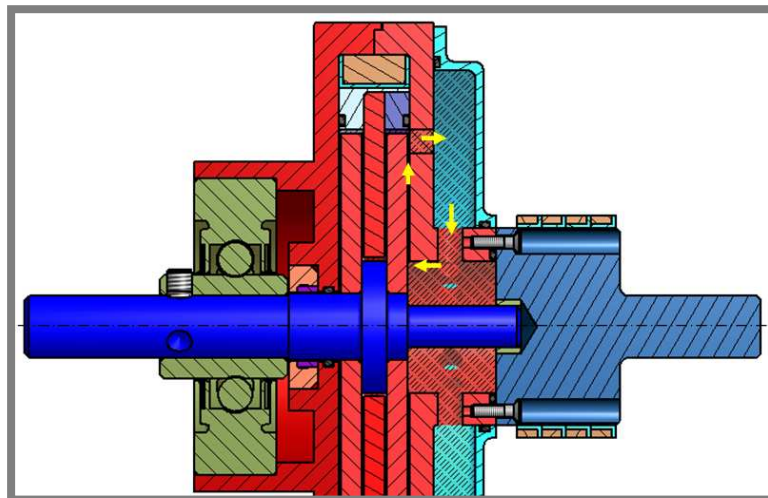
$$\Downarrow$$

$$V = \frac{P \Delta t}{LDE} = \frac{3,67 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ s}}{9,99 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}} = 131,95 \text{ cm}^3 \quad (67)$$

kde:

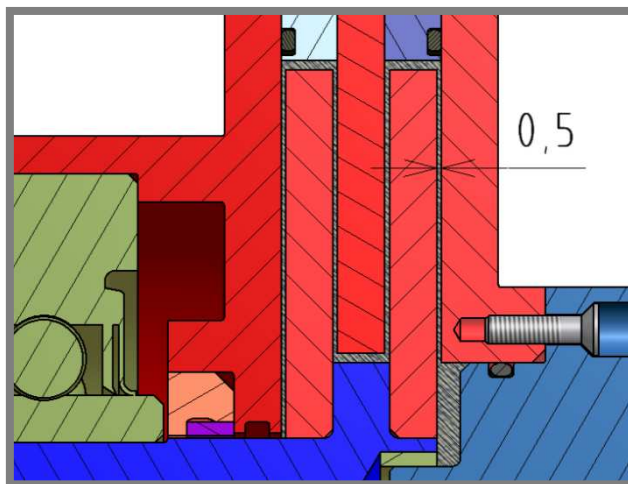
LDE	J/cm^3	- parametr LDE
n	$1/\text{min}$	- otáčky
M	Nm	- krouticí moment
ω	$1/\text{s}$	- úhlová rychlost
P	W	- výkon
Δt	s	- doba provozu zařízení

Objem kapaliny by tedy v ideálním případě pro MR spojku s životností 1000 h při 3500 ot/min měl být 132 cm^3 . Konstrukce tak má rezervoár velkých rozměrů a je nutné řešit proudění náplně tak, aby celkový objem kapaliny byl rovnoměrně zatěžován (Obr. 7.2).



Obr. 7.2 Detail řezu MR spojkou s velkým rezervoárem MR kapaliny.

Pro případ zařízení na testování životnosti MR kapaliny je však vzorek 132 cm^3 příliš velký a drahý. Pro spojku vhodnou pro testování životnosti MR kapalin byl zvolen objem náplně na 20 cm^3 . Jedná se o reprezentativní objem náplně, která stojí přibližně 255 Kč (15 USD).



Obr. 7.3 Detail MR mezery.

$$V_1 = 20 \text{ cm}^3$$

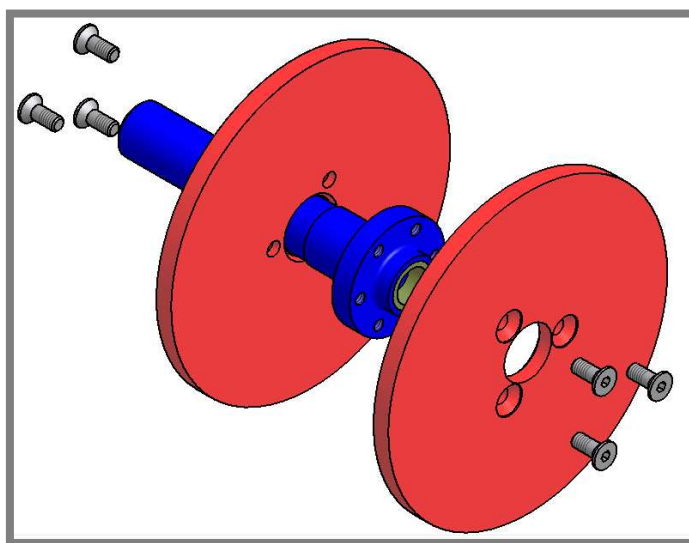
$$\Delta t_1 = \frac{V_1 LDE}{P} = \frac{20 \text{ cm}^3 \cdot 9,99 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{cm}^3}}{3,67 \cdot 10^3 \text{ W}} = 151,58 \text{ h} \quad (68)$$

kde:

V_1	cm^3	- objem vzorku MR kapaliny
Δt_1	h	- doba zkoušky trvanlivosti náplně

Při objemu 20 cm^3 tak nebude nutné čekat na znehodnocení MR kapaliny 1000 hodin. Doba zkoušky trvanlivosti MR kapaliny se změnou objemu náplně spojky sníží na zhruba 150 hodin. V rotačních MR zařízeních dochází rovněž k odstředování magnetických částic. Z tohoto důvodu je rezervoár umístěn u osy rotace, kde je nejnižší obvodová rychlost. Je tak zajištěno proudění MR kapaliny ve spojce a odstředování částic není tak výrazné.

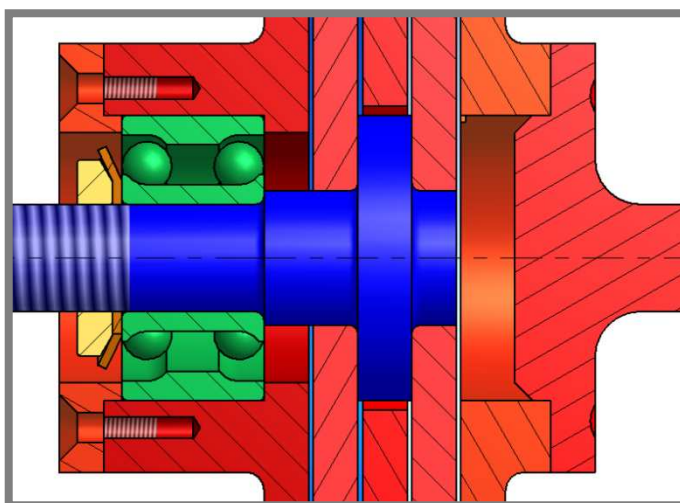
7.2 Rotorová část



Obr. 7.4 Rozpad rotorové části

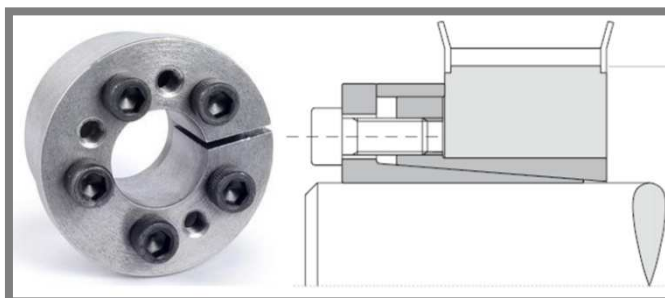
7.2.1 Ložisko

Volba ložiska a jeho spojení s hřídelí byl první problém, který bylo potřeba vyřešit. Prvním způsobem je použití klasického ložiska, které je na hřídeli pojištěno pomocí KM matice a MB podložky. Tato možnost byla vyhodnocena jako neefektivní z důvodu vzniku velkých koncentrátorů napětí na hřídeli.



Obr. 7.5 Řez spojkou s KM maticí MB podložkou.

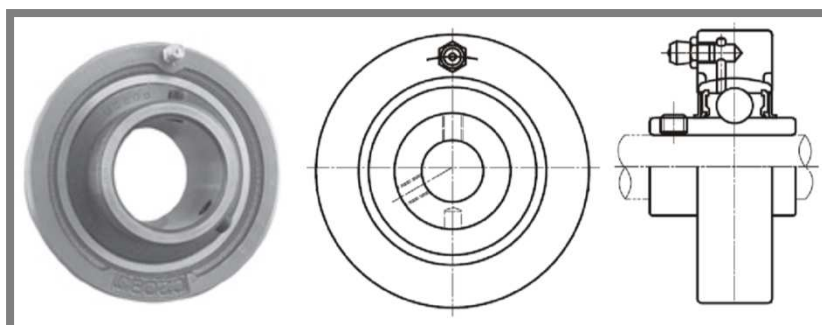
Jelikož je nutné, aby šlo spojku snadno demontovat, je počítáno s vůlí mezi ložiskem a hřídelí. Aby bylo vyhověno tomuto požadavku je možné použití například samostředícího svěrného pouzdra.



Obr. 7.6 Samostředící svěrné pouzdro [5]

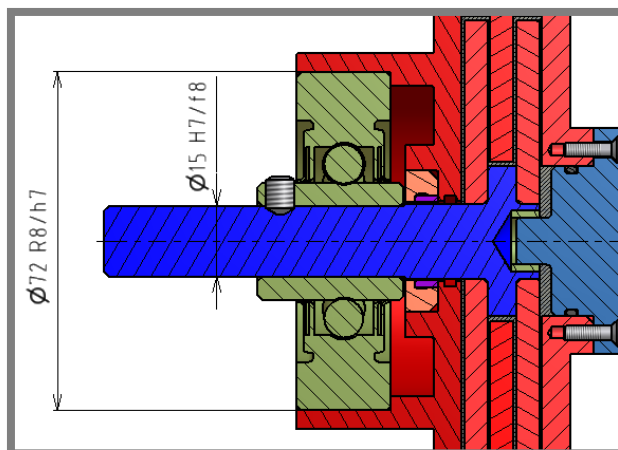
Svěrná pouzdra velice dobře spojí hřídel a ložisko. Jejich nevýhodou je zvětšení vnitřního průměru použitého ložiska. Je tedy nutné použít větší ložisko. Hlavní nevýhodou je však vysoká cena. Samotné svěrné pouzdro stojí dle rozměru zhruba o 10% více než korespondující ložisko.

Z výše uvedených důvodů je by mělo být upínací ložisko nejvhodnější variantou uložení hřídele. Upínací ložiska se mohou montovat do různých typů litinových domků. Pro tento případ byla vybrána ložisková jednotka s litinovým tělesem UCC 202 (Obr. 7.7).



Obr. 7.7 Ložisková jednotka UCC202[6]

Hřídel je nasunuta do upínacího ložiska a jejich vzájemná pozice v axiálním směru se zajišťuje pomocí dvou stavěcích šroubů M6 s vnitřním šestihranem.



Obr. 7.8 Detail řezu s ložiskovou jednotkou UCC202.

Tento způsob jednoduchého spojení hřídele a ložiska je výhodný především z důvodu snadného rozmontování spojky. Mezi nábojem a hřídelí je dostatečná vůle (MIN 0,02; MAX 0,06), aby bylo možné snadné rozmontování bez nutnosti lisování, zároveň však bez ztráty tvarové charakteristiky kontaktu. Ložisková jednotka je v levé části statoru nalisována. Pro lisované spojení bylo zvoleno spojení se zaručeným přesahem (MIN 0,01; MAX 0,09).

Pro ložisko je požadována životnost alespoň dvou let při provozních otáčkách 3500 ot/min a pravděpodobnosti poruchy 10%. Zařízení bude provozováno v laboratorních podmínkách. Ložisko je zapouzdřeno a naplněno plastickým mazivem na celou dobu jeho životnost.

$$n = 3500 \text{ min}^{-1}$$

$$L = 1,75 \cdot 10^4 \text{ hod}$$

$$C = 9,88 \text{ kN}$$

$$P = 50 \text{ N}$$

$$a = 3$$

$$L_{10,h} = \left(\frac{C}{P}\right)^a \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} = \left(\frac{9,88 \text{ kN}}{50 \text{ N}}\right)^3 \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 3500 \text{ min}^{-1}} = 1,51 \cdot 10^5 \text{ hod} \quad (69)$$

$$L_{10,h} \gg L$$

kde:

n	min^{-1}	- frekvence otáčení
L	hod	- požadovaná životnost ložiska
C	N	- dynamická únosnost
P	N	- zatížení ložiska
a	1	- exponent typu ložiska
$L_{10,h}$	hod	- životnost ložiska

7.2.2 Vstupní hřídel

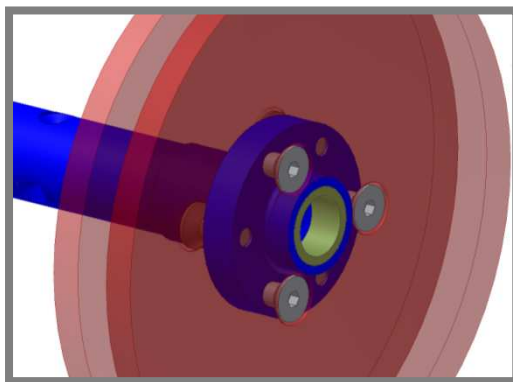
Materiál vstupní hřídele byl zvolen s ohledem na magnetický obvod spojky. Magnetický odpor (feromagnetické) ocelové hřídele by byl nižší než magnetický odpor části smyčky, po které magnetický tok prochází přes pracovní prostor (kapitola 6.2). Z důvodu vyhovujících magnetických vlastností, nízkých nákladů, dobré obrobitelnosti a dobré dostupnosti byla proto zvolena duralová slitina EN AW-2030 T4 (AlCu4PbMg). Do budoucna se uvažuje o výrobě hřídele z některé nerezové oceli, která je rovněž paramagnetická a dosahuje vyšší pevnosti a ořezuvzdornosti než dural.

Jelikož je hřídel namáhána ohybem za rotace a krutem je nutné provést únavovou pevnostní kontrolu. Předpokládá se, že koncentrátoři napětí se objeví u polohovacích děr ložiskové jednotky.

Z napěťové analýzy (Příloha I), při které byla hřídel zatížena krouticím momentem (10 Nm) a zároveň ohybovým momentem způsobeným tíhovou silou (50 N), se v koncentrátorech napětí vyskytuje maximální redukované napětí (HMH) 57,5 MPa. Koeficient bezpečnosti vzhledem k mezi únavy tak v koncentrátorech vlivem kombinovaného namáhání klesne na 3,8.

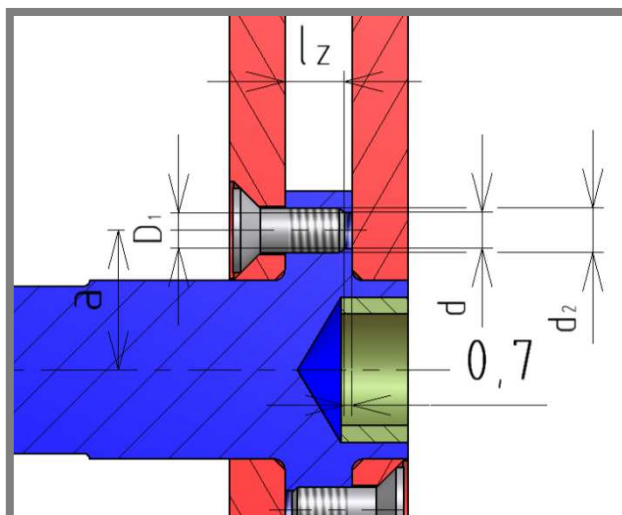
Polohovací díry ložiskové jednotky musí být vyvrtány s nejvyšší možnou přesností. Ačkoliv jsou klíčové rozměry hlavních součástí vyrobeny s vysokou přesností, i pouhé vymezení tolerancí může mít za následek změnu požadované šířky MR mezery. Pokud by k takovéto výrobní chybě došlo, celá sestava by nefungovala správně. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o vyvrtání polohovacích děr ložiskové jednotky až po smontování celé sestavy. Tímto způsobem je možné zaručeně zajistit správnou šířku MR mezer.

K osazení na hřídeli jsou přišroubovány dvě rotorové lamely. V tomto konstrukčním uzlu jsou kladeny velké nároky na přesnost a jednoduchou rozebíratelnost spojení. Použití šroubového spojení je v tomto případě nejlepší volba. Počet šroubů, které připojují lamelu k hřídeli, byl stanoven na tři s ohledem na dodržení rovnoběžnosti stykových ploch a celkové tvarové přesnosti spojení.



Obr. 7.9. Detail šroubového spoje rotorové části

Šrouby jsou v tomto případě namáhány smykovým napětím. Je proto nutné udělat pevnostní kontrolu. Jedná se o šrouby se zápustnou hlavou M4 vyrobené z uhlíkové oceli podle ČSN EN ISO 2009 v pevnostní třídě 4.8, Podle normy ČSN EN ISO 898-1 tak mají šrouby smluvní mez kluzu $R_{p0,2}(4.8) = 320$ MPa.



Obr. 7.10 Detail řezu rotorovou částí

$$R_{p0,2}(4.8) = 320 \text{ MPa}$$

$$M = 10 \text{ Nm}$$

$$a = 12,5 \text{ mm}$$

$$i = 6$$

$$P = 0,7 \text{ mm}$$

$$d_2 = 3,545 \text{ mm}$$

$$d_3 = 3,141 \text{ mm}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$f_z = 0,2$$

$$k_n = 1,5$$

$$f_{AlOcel} = 0,61$$

$$F = \frac{M}{i a} = \frac{10 \text{ Nm}}{6 \cdot 12,5 \text{ mm}} = 133,33 \text{ N} \quad (70)$$

$$F_i = \frac{k_n F}{f_{AlOcel}} = \frac{1,5 \cdot 133,33 \text{ N}}{1,5} = 327,87 \text{ N} \quad (71)$$

$$M_z = \frac{F_i d_2}{2} \left(\frac{P + \pi f_z d_2 \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi d_2 + f_z P \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = \quad (72)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{327,87 \text{ N} \cdot 3,545 \text{ mm}}{2} \cdot \left(\frac{0,7 \text{ mm} + \pi \cdot 0,2 \cdot 3,545 \text{ mm} \cdot \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right)}{\pi \cdot 3,545 \text{ mm} + 0,2 \cdot 0,7 \text{ mm} \cdot \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} \right) = \\
&= 0,173 \text{ Nm} \\
\tau_z &= \frac{16M_z}{\pi d_3^3} = \frac{16 \cdot 0,173 \text{ Nm}}{\pi \cdot 3,141^3 \text{ mm}^3} = 28,47 \text{ MPa} \quad (73)
\end{aligned}$$

$$\tau_z \ll R_{p0,2}(4.8)$$

kde:

$R_{p0,2}(4.8)$	MPa	- smluvní mez pružnosti šroubu pevnostní třídy 4.8
M	Nm	- krouticí moment
e	mm	- rameno síly
i	1	- počet šroubů ve spojení
P	mm	- rozteč
d_2	mm	střední závit šroubu
d_3	mm	- malý závit šroubu
α	deg	- úhel profilu metrického závitu podle ISO
f_z	1	- součinitel tření v závitu
f_{AlOcel}	1	- součinitel tření mezi hliníkovou slitinou a ocelí
F	N	- síla na jeden šroub
M_z	Nm	- složka utahovacího momentu
τ_z	MPa	- smykové napětí ve šroubu

Vlivem namáhání krouticím momentem dochází zároveň k namáhání závitů děr v osazení hřídele. Norma ČSN EN ISO 898-1 hovoří o maximálním napětí v závitech matice daného materiálu. Podle této normy je na závitech matice z hliníkových slitin maximální dovolené napětí 30 MPa. Je proto nutné výpočtem ověřit, zdali toto napětí není překročeno.

$$\sigma_{zMAX} = 30 \text{ MPa}$$

$$k_n = 1,5$$

$$P = 0,7 \text{ mm}$$

$$d = 4 \text{ mm}$$

$$D_1 = 3,242 \text{ mm}$$

$$f_{AlOcel} = 0,61$$

$$l_z = 4,9 \text{ mm}$$

$$n_z = \frac{l_z}{P} = \frac{4,9 \text{ mm}}{0,7 \text{ mm}} = 7 \quad (74)$$

$$F_i = \frac{k_n F}{f_{AlOcel}} = \frac{1,5 \cdot 133,33}{0,61} = 327,87 \text{ N} \quad (75)$$

$$p_z = \frac{F_i}{n_z \frac{\pi}{4} (d^2 - D_1^2)} = \frac{327,87 \text{ N}}{7 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (4^2 \text{ mm}^2 - 3,242^2 \text{ mm}^2)} = 10,82 \text{ MPa} \quad (76)$$

$$p_z \ll \sigma_{zMAX}$$

kde:

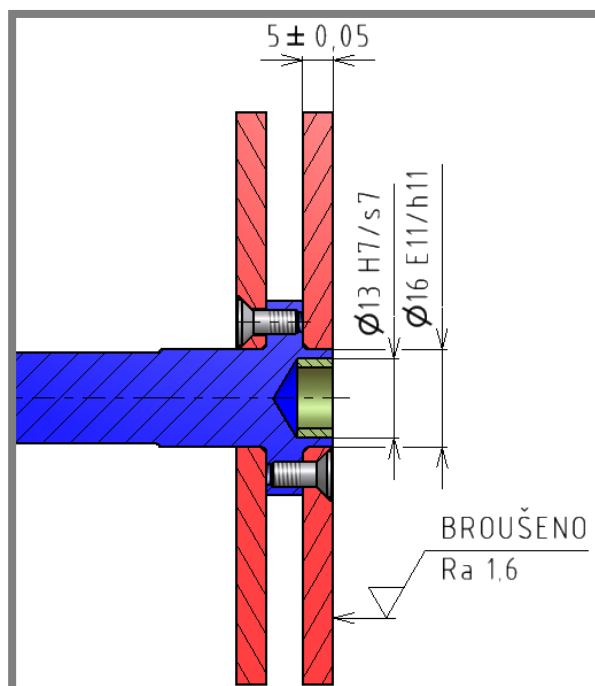
σ_{zMAX}	MPa	- maximální napětí v závitech
k_n	1	- návrhový součinitel
P	mm	- rozteč závitu
d	mm	- velký (jmenovitý) průměr závitu
D_1	mm	- malý průměr závitu
f_{AlOcel}	1	- součinitel tření mezi plochou z hliníkové slitiny a ocelí
l_z	mm	- délka zašroubování
n_z	1	- počet zašroubovaných závītů
F_i	N	- síla předpětí závitu šroubu
p_z	MPa	- tlak v závitech

Ve spojení byly použity šrouby o délce 10 mm. Šrouby této délky byly voleny opět s ohledem na magnetický obvod. Mezi koncem šroubu a druhou rotorovou lamelou tak vzniká 0,7 mm široká vzduchová mezera. Vzduch má velký magnetický odpor, čímž se zabráňuje procházení magnetického toku mimo pracovní prostor MR spojky.

Do dutiny hřídele je upevněno bronzové pouzdro (CW 453K - CuSn8). Toto pouzdro ve spojení se statorovou hřídelí má za účel zvýšení stability rotorové části spojky a potažmo tak celého systému. Bylo zvoleno uložení s přesahem (MIN 0,01; MAX 0,05). Pouzdro je tedy do hřídele pevně nalisováno.

7.2.3 Rotorové lamely

Rotorové lamely jsou ocelové disky, pomocí kterých je přenášen krouticí moment z rotorové části na část statorovou. Pro výrobu lamel byla zvolena ocel 11 503 (S355J2G3) z důvodů dostupnosti, dobré obrobítelnosti a dostatečných pevnostních vlastností. Šířka lamel byla zvolena na 5 mm z důvodu možnosti upnutí pomocí šroubů se zápusťnou hlavou. Uložení mezi otvorem v lamelách a hřídelí bylo zvoleno s vůlí (MIN 0,03; MAX 0,25).

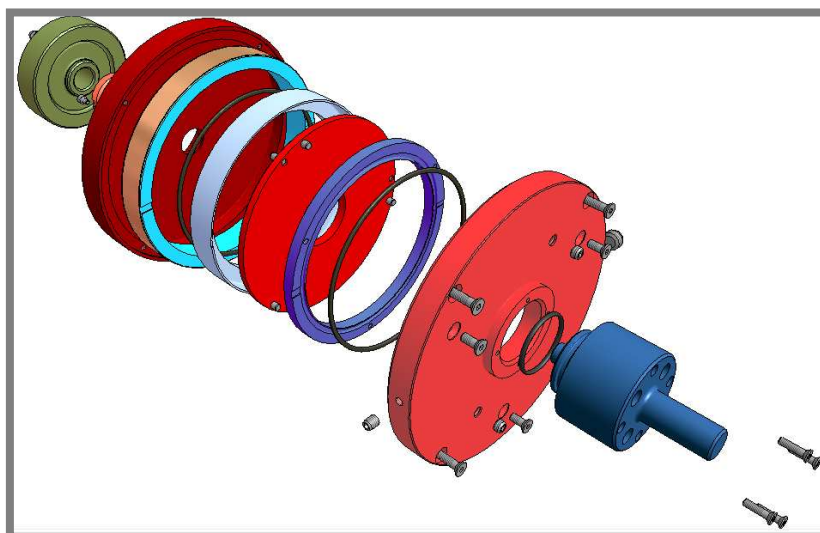


Obr. 7.11 Detail řezu rotorovou částí.

Jelikož obě strany lamel jsou funkčními plochami, je nutné zajistit jejich rovnoběžnost. Z tohoto důvodu byly obě strany lamel broušeny. Touto technologií se dosáhlo nejenom přesnosti rozměrů, geometrické přesnosti ale i struktury povrchu. Jemná struktura povrchu je na pracovních plochách důležitá zejména z důvodu snížení abrazivních účinků MR kapaliny.

7.3 Statorová část

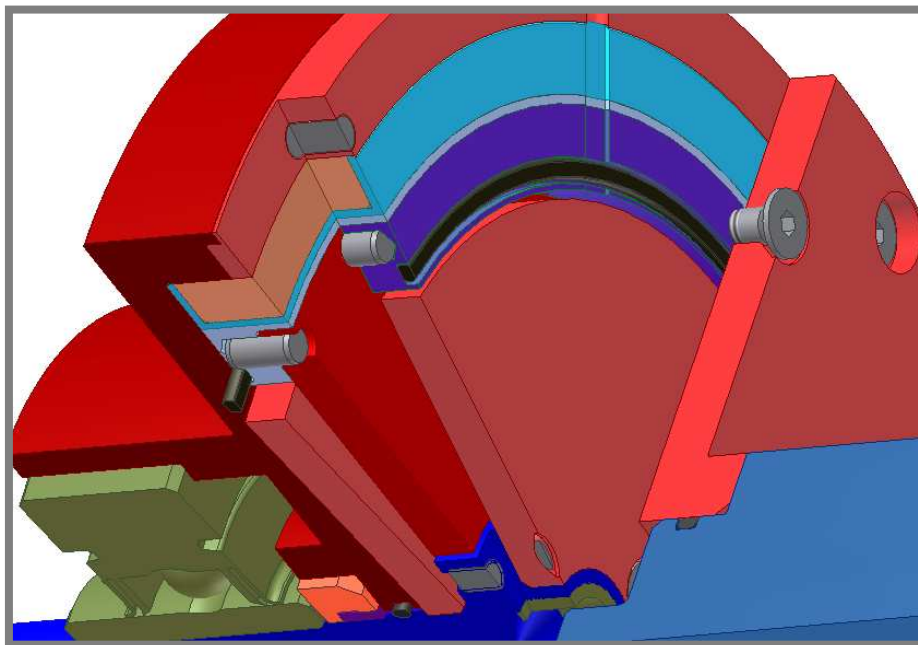
7.3



Obr. 7.12 Rozpad statorové část.

Konstrukce statorové části je navržena tak, aby magnetický tok vytvořený elektromagnetickou cívkou byl veden efektivně pouze napříč pracovním prostorem.

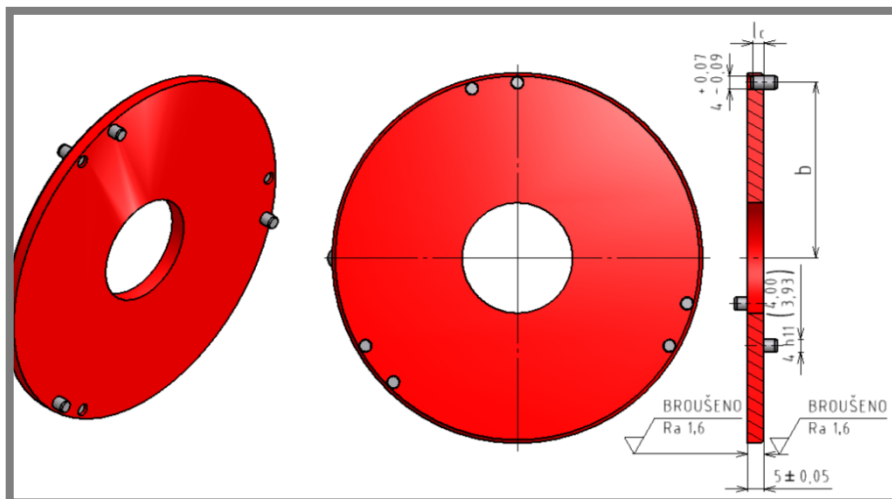
Z toho vyplývá relativní komplikovanost spojení některých částí konstrukce (Obr. 7.13). Druhým kritériem byla opět jako u části rotorové snadná rozebíratelnost.



Obr. 7.13 Detail řezu MR spojkou

7.3.1 Statorová lamela

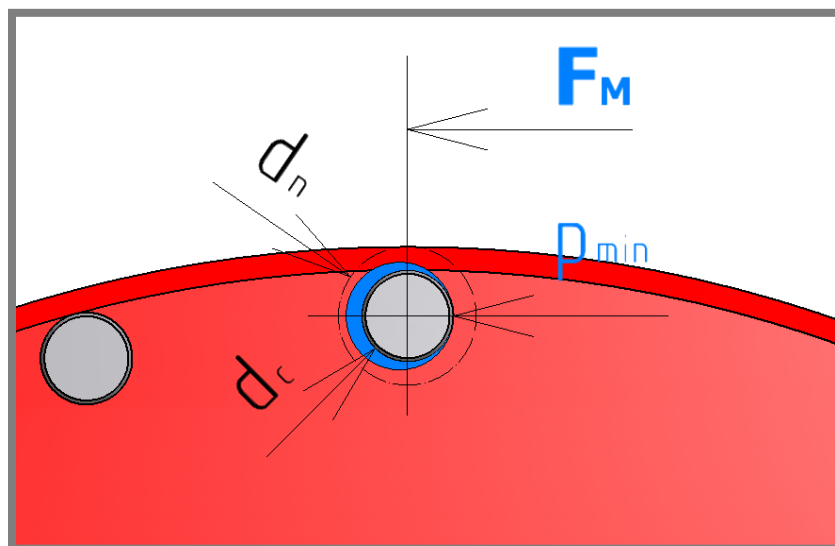
Statorová lamela je součást, která společně s levou a pravou částí statoru, přenáší krouticí moment z rotorové části. Lamela je vyrobena z feromagnetické oceli 11 503 (S355J2G3). Šířka lamely byla zvolena na 5 mm. Lamela byla z obou stran broušena. Tímto technologickým postupem bylo dosaženo vysoké rozměrové přesnosti, požadované geometrické přesnosti (rovnoběžnost pracovních ploch) a struktury povrchu



Obr. 7.14 Statorová lamela s čepy.

Na vnějším obvodu lamely je vyvrtáno šest otvorů, do kterých jsou zalisovány válcové čepy. Čepy jsou podle normy ČSN EN 22340 vyrobeny v tolerančním poli h11. Z tohoto údaje vychází volba rozměrové tolerance díry. Tato tolerance zajišťuje

minimální přesah 0,01 mm a maximální přesah 0,09 mm. Funkčnost tohoto spojení (zvoleného přesahu) je potřeba ověřit výpočtem. Vlivem působení krouticího momentu dochází v radiálním směru nalisovaného spojení k vzniku tlaku (u volných spojů by tento tlak způsoboval otláčení). Pokud by tento tlak na jedné straně vyrovnal napětí způsobené pružnými deformacemi nalisovaného spoje, mohlo by dojít k přerušení třecího spojení nebo jeho tvarové definice.



Obr. 7.15 Detail nalisovaného spojení čepu a statorové lamely.

$$i = 6$$

$$b = 0,054 \text{ m}$$

$$M = 10 \text{ Nm}$$

$$l_c = 3,4 \text{ mm}$$

$$d_n = 6 \text{ mm}$$

$$d_c = 4 \text{ mm}$$

$$R_{ac} = 3 \text{ } \mu\text{m}$$

$$R_{an} = 3 \text{ } \mu\text{m}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,3$$

$$F_M = \frac{M}{i \cdot b} = \frac{10 \text{ Nm}}{6 \cdot 0,054 \text{ m}} = 30,86 \text{ N} \quad (77)$$

$$p_{min} = \frac{F_M}{d_c l_c} = \frac{30,86 \text{ N}}{4 \text{ mm} \cdot 3,4 \text{ mm}} = 2,27 \text{ MPa} \quad (78)$$

$$\Delta d_z = 1,2(R_{ac} + R_{an}) = 1,2(3 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}) = 7,2 \mu\text{m} \quad (79)$$

$$C_n = \frac{d_n^2 + d_c^2}{d_n^2 - d_c^2} = \frac{36 \text{ mm}^2 + 16 \text{ mm}^2}{36 \text{ mm}^2 - 16 \text{ mm}^2} = 2,6 \quad (80)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_{min} &= d_c p_{min} \left(\frac{C_n + \mu}{E} + \frac{1 - \mu}{E} \right) + \Delta d_z \\ &= 4 \text{ mm} \cdot 2,27 \text{ MPa} \left(\frac{2,6 + 0,3}{2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}} + \frac{1 - 0,3}{2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}} \right) + 7,2 \mu\text{m} = \\ &= 0,007 \text{ mm} \end{aligned} \quad (81)$$

kde:

i	1	- počet čepů na spojení
b	mm	- rameno síly (Obr. 7.14)
M	Nm	- krouticí moment
l_c	mm	- délka zalisování čepu (Obr. 7.14)
d_n	mm	- teoretický průměr náboje
d_c	mm	- průměr čepu
R_{cz}	μm	- výška nerovnosti povrchu čepu
R_{nz}	μm	- výška nerovnosti povrchu díry
E	MPa	- modul pružnosti oceli
μ	1	- Poissonovo číslo
F_M	N	- síla způsobená krouticím momentem
p_{min}	MPa	- minimální tlak pro v nalisovaném spojení
Δd_z	μm	- odhad ztráty přesahu uhlazením dotykových ploch
C_n	1	- rozměrová konstanta náboje
Δd_{min}	mm	- minimální přesah spojení

Čepy jsou namáhány smykovým napětím, je tedy nutné provést pevnostní kontrolu čepů. Čepy ČEP 4 x 8 A ISO 2340 – St jsou vyrobeny z automatové oceli. Mez kluzu materiálu čepů je $R_{e11\ 109}=300\text{MPa}$ (ČSN 11 109, ISO 11SMn30).

$$R_{e11\ 109} = 300 \text{ MPa}$$

$$\tau_s = \frac{4F_M}{\pi d_c^2} = \frac{4 \cdot 30,86 \text{ N}}{\pi \cdot 4 \text{ mm}} = 2,46 \text{ MPa} \quad (82)$$

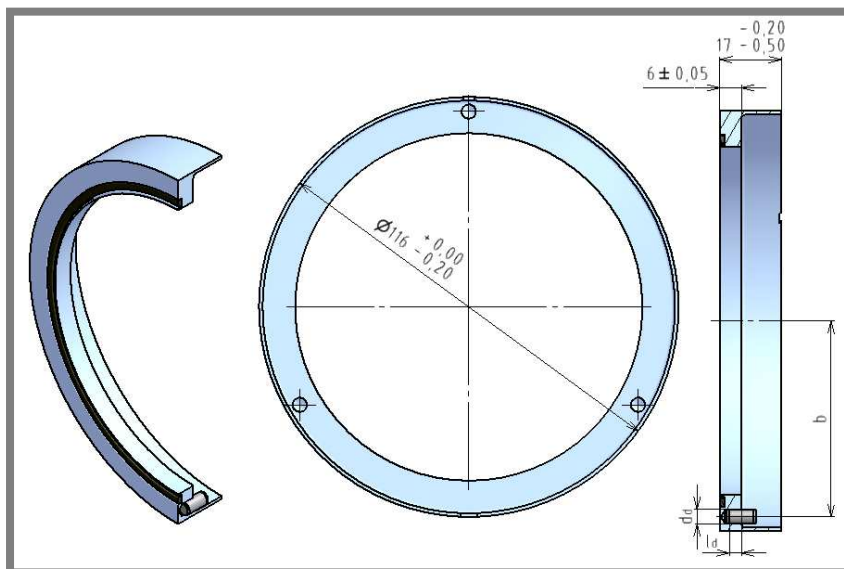
$$\tau_s \ll R_{e11\ 109}$$

kde:

$R_{e11\ 109}$	MPa	- mez kluzu materiálu čepů podle ČSN EN 22340
τ_s	MPa	- smykové napětí čepu

7.3.2 Rámeček

Tato součást má za úkol vymezovat polohu statorové lamely. Statorová lamela je zasunuta do dutiny v rámečku. Aby bylo možné toto spojení snadno rozebírat bylo zvoleno spojení s minimální vůlí 0,01 mm a maximální vůlí 1,17 mm. Protáčení lamely v rámečku je zabráněno pomocí trojce čepů, které jsou nalisovány ve statorové lamele a s vůlí zapadají do otvorů v rámečku. Minimální vůle tohoto uložení byla 0,1 mm maximální vůle 0,17 mm.



Obr. 7.16 Rámečky pohledy a řezy.

Rámeček je vyroben z duralu ($R_{p0,2}=220$ MPa). Hlavním důvodem pro použití tohoto materiálu je vysoký magnetický odpor. Dalšími důvody jsou poté dobrá obrobiteľnosť a nízka cena. Jelikož jsou čepy zapadající do děr v rámečku vyrobeny z automatové oceli a mají vyšší pevnost, je nutné ověřit, zdali nebude docházet k otláčování otvorů.

$$d_d = 4,1 \text{ mm}$$

$$l_d = 3,4 \text{ mm}$$

$$F_M = \frac{M}{i \cdot b} = \frac{10 \text{ Nm}}{3 \cdot 0,054 \text{ m}} = 61,63 \text{ N} \quad (83)$$

$$p_d = \frac{F_M}{d_d l_d} = \frac{61,63 \text{ N}}{4,1 \text{ mm} \cdot 3,4 \text{ mm}} = 4,54 \text{ MPa} \quad (84)$$

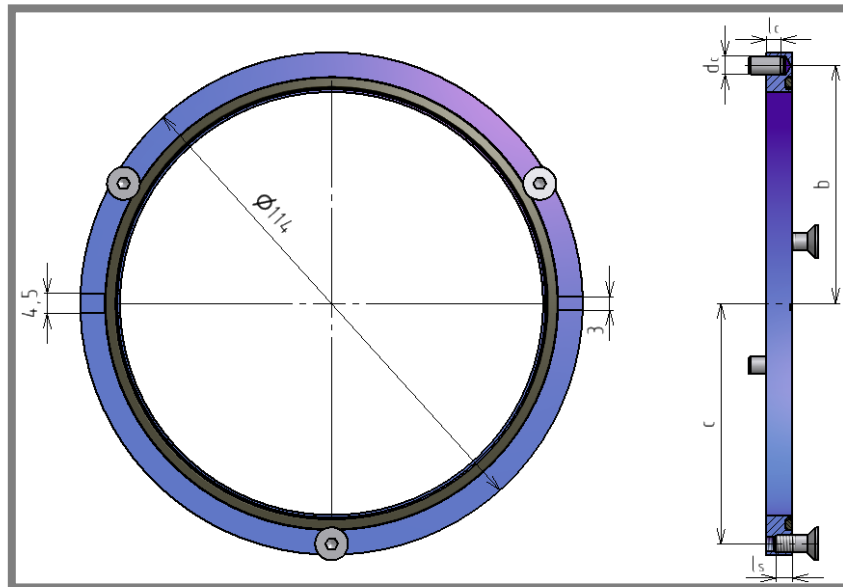
$$p_d \ll$$

kde:

d_d	mm	- průměr díry
l_d	mm	- délka kontaktu
p_d	MPa	- tlak v kontaktu
$R_{p0,2}$	MPa	- smluvní mez kluzu materiálu EN AW-2030 T4

7.3.3 Příložka

Tato součást má za úkol udržovat statorovou lamelu na správném místě a zároveň přenášet krouticí moment ze statorové lamely na celou statorovou část.



Obr. 7.17 Pohled, řezy příložka.

Čepy nalisované ve statorové lamele zapadají do děr v příložce se stejnou vůlí jako do rámečku. Díry jsou vyvrtány na roztečné kružnici jako díry v rámečku. Z tohoto důvodu není již nutné kontrolovat otvory pro čepy na otlačení.

Součást je připevněna pomocí tří šroubů se zápustnou hlavou k pravé části statoru. Tyto šrouby jsou namáhány smykovým napětím, rovněž může docházet k otláčování závitů v duralové příložce. Podle normy ČSN EN ISO 898-1 může být maximální napětí v závitech matice 30 MPa.

$$c = 54,5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{zMAX} = 30 \text{ MPa}$$

$$k_n = 1,5$$

$$P = 0,7 \text{ mm}$$

$$d = 4 \text{ mm}$$

$$D_1 = 3,242 \text{ mm}$$

$$f_{AlOcel} = 0,61$$

$$l_z = 3,7 \text{ mm}$$

$$n_z = \frac{l_z}{P} = \frac{3,7 \text{ mm}}{0,7 \text{ mm}} = 5,2 \quad (85)$$

$$F = \frac{M}{i \cdot c} = \frac{10 \text{ Nm}}{3 \cdot 54,5 \text{ mm}} = 61,16 \text{ N} \quad (86)$$

$$F_i = \frac{k_n F}{f_{AlOcel}} = \frac{1,5 \cdot 61,16}{0,61} = 150,40 \text{ N} \quad (87)$$

$$p_z = \frac{F_i}{n_z \frac{\pi}{4} (d^2 - D_1^2)} = \frac{150,40 \text{ N}}{5,2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (4^2 \text{ mm}^2 - 3,242^2 \text{ mm}^2)} = 6,6 \text{ MPa} \quad (88)$$

$$p_z \ll \sigma_{zMAX}$$

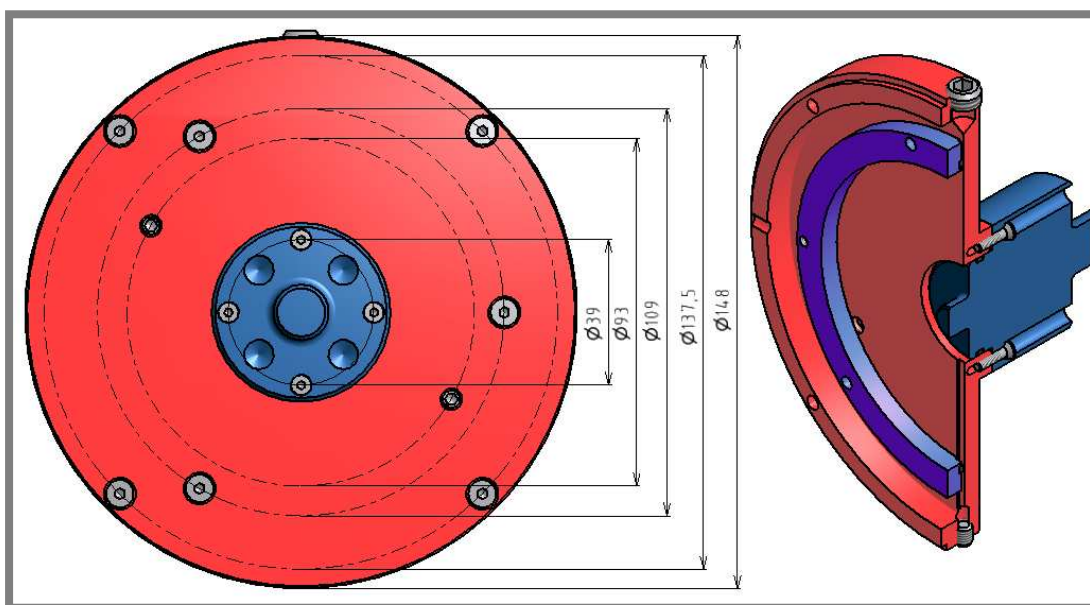
kde:

c	mm	- rameno síly
σ_{zMAX}	MPa	- maximální napětí v závitech
k_n	1	- návrhový součinitel
P	mm	- rozteč závitu
d	mm	- velký (jmenovitý) průměr závitu
D_1	mm	- malý průměr závitu
f_{AlOcel}	1	- součinitel tření mezi plochou z hliníkové slitiny a ocelí
l_z	mm	- délka zašroubování
n_z	1	- počet zašroubovaných závitů
F_i	N	- síla předpětí závitu šroubu
p_z	MPa	- tlak v závitech

7.3.4 Pravá část statoru

7.3.4

Pravá část statoru plní v konstrukci funkci zároveň statorové lamely a vnějšího obalu. Součást je vyrobena z feromagnetické oceli 11 503 (S355J2G3).

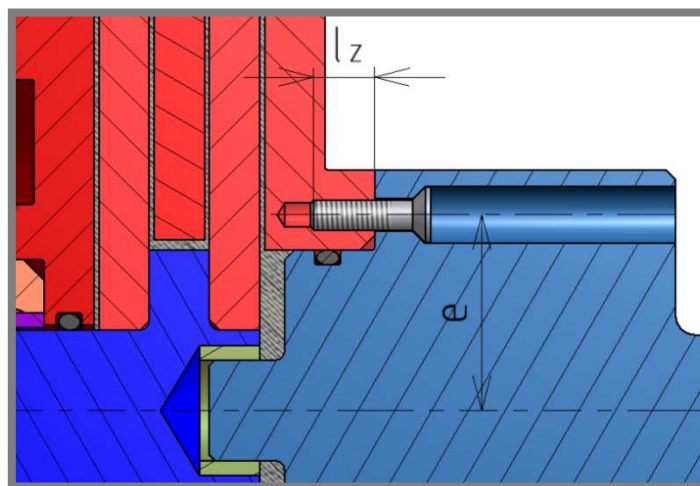


Obr. 7.18 Pohledy na pravou část statoru.

Na vnější straně součásti jsou vyvrtány otvory pro šrouby se zápusnými hlavami. Těmito šrouby je v podstatě celá sestava smontována. V průběhu řešení bylo zvažováno, zdali připojit podsestavu statorová lamela + rámeček + příložka k pravé části statoru, k levé části statoru nebo k oběma částem zároveň. Z důvodu šetření provozních nákladů a strojového času bylo rozhodnuto o tom, že většina funkčních děr a otvorů bude vyvrtána na pravé části statoru.

Na vnější straně pravé části statoru na roztečné kružnici o průměru 109 mm jsou tedy vyvrtány tři díry podle ČSN EN ISO 15065 pro připojení příložky. Otláčení těchto děr působením krouticího momentu není nutné počítat vzhledem k tomu, že nedojde k otláčení závitů duralové příložky, tedy součásti z materiálu o nižší pevnosti.

Na roztečné kružnici o průměru 39 mm jsou vyrobeny čtyři díry se závity M3 pro připojení statorové (výstupní) hřídele.



Obr. 7.19 Detail spojení statorové hřídele a pravé části statoru.

Šroubové spojení je namáháno krouticím momentem, je proto nutné provést pevnostní výpočet smykového namáhání šroubu a otláčení závitů díry. Šrouby vyrobené v pevnostní třídě 4.8 mají smluvní mez pružnosti 320 MPa.

$$R_{p0,2}(4.8) = 320 \text{ MPa}$$

$$M = 10 \text{ Nm}$$

$$e = 19,5 \text{ mm}$$

$$i = 4$$

$$P = 0,5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 2,675 \text{ mm}$$

$$d_3 = 2,387 \text{ mm}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$f_z = 0,2$$

$$k_n = 1,5$$

$$f_{AlOcel} = 0,61$$

$$F = \frac{M}{i \cdot e} = \frac{10 \text{ Nm}}{4 \cdot 19,5 \text{ mm}} = 128,21 \text{ N} \quad (89)$$

$$F_i = \frac{k_n F}{f_{AlOcel}} = \frac{1,5 \cdot 128,21 \text{ N}}{1,5} = 315,26 \text{ N} \quad (90)$$

$$M_z = \frac{F_i d_2}{2} \left(\frac{P + \pi f_z d_2 \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi d_2 + f_z P \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) =$$

$$= \frac{315,26 \text{ N} \cdot 2,675 \text{ mm}}{2} \cdot \left(\frac{0,5 \text{ mm} + \pi \cdot 0,2 \cdot 2,675 \text{ mm} \cdot \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right)}{\pi \cdot 2,675 \text{ mm} + 0,2 \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot \sec\left(\frac{60^\circ}{2}\right)} \right) =$$

$$= 0,124 \text{ Nm} \quad (91)$$

$$\tau_z = \frac{16 M_z}{\pi d_3^3} = \frac{16 \cdot 0,124 \text{ Nm}}{\pi \cdot 2,387^3 \text{ mm}^3} = 46,50 \text{ MPa} \quad (92)$$

$$\tau_z \ll R_{p0,2}(4.8)$$

kde:

$R_{p0,2}(4.8)$	MPa	- smluvní mez pružnosti šroubu pevnostní třídy 4.8
M	Nm	- krouticí moment
e	mm	- rameno síly
i	1	- počet šroubů ve spojení
P	mm	- rozteč
d_2	mm	- střední závit šroubu
d_3	mm	- malý závit šroubu
α	deg	- úhel profilu metrického závitu podle ISO
f_z	1	- součinitel tření v závitě
f_{AlOcel}	1	- součinitel tření mezi hliníkovou slitinou a ocelí
F	N	- síla na jeden šroub
M_z	Nm	- složka utahovacího momentu
τ_z	MPa	- smykové napětí ve šroubu

I přestože to není příliš pravděpodobné, může dojít při namáhání rovněž k otláčení závitů díry vyvrtané v součásti. Podle normy ČSN EN ISO 898-1 může maximální napětí v závitech matice z oceli pro šrouby pevnostní třídy 4.8 dosáhnout 75 MPa.

$$\sigma_{zMAX} = 75 \text{ MPa}$$

$$d = 3 \text{ mm}$$

$$D_1 = 2,459 \text{ mm}$$

$$l_z = 6 \text{ mm}$$

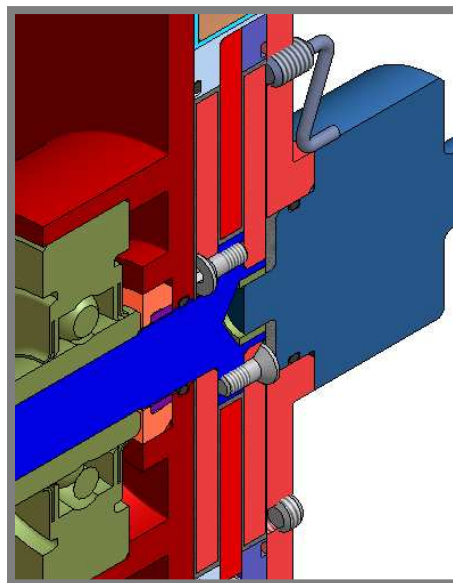
$$n_z = \frac{l_z}{P} = \frac{6 \text{ mm}}{0,5 \text{ mm}} = 12 \quad (93)$$

$$p_z = \frac{F_i}{n_z \frac{\pi}{4} (d^2 - D_1^2)} = \frac{315,26 \text{ N}}{12 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (3^2 \text{ mm}^2 - 2,459^2 \text{ mm}^2)} = 11,33 \text{ MPa} \quad (94)$$

$$p_z \ll \sigma_{zMAX}$$

kde:

σ_{zMAX}	MPa	- maximální napětí v závitech
d	mm	- velký (jmenovitý) průměr závitu
D_1	mm	- malý průměr závitu
l_z	mm	- délka zašroubování
n_z	1	- počet zašroubovaných závitů
p_z	MPa	- tlak v závitech

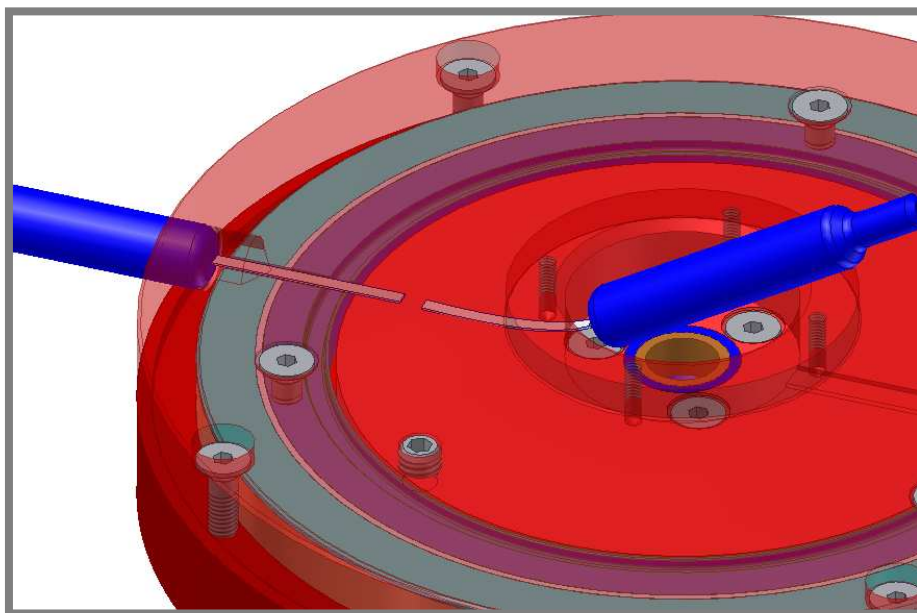


Obr. 7.20 Řez spojkou s teploměrem.

Na roztečné kružnici o průměru 90 mm jsou na vnější straně pravé části statoru vyvrtány dvě díry se závitem M6. Jedna díra slouží k přimontování teploměru, který tak bude měřit přímo teplotu náplně (navíc měření teploty bude probíhat v místě, ve kterém bude MR kapalina nejvíce namáhána). Druhá díra bude ucpána a utěsněna šroubem. Důvodem pro vytvoření dvou děr je plnění. Při plnění budou odstraněny obě ucpávky (teploměr nebo šroub), spodní dírou se bude spojka plnit MR kapalinou, vrchní díra bude sloužit jako odvětrávací otvor.

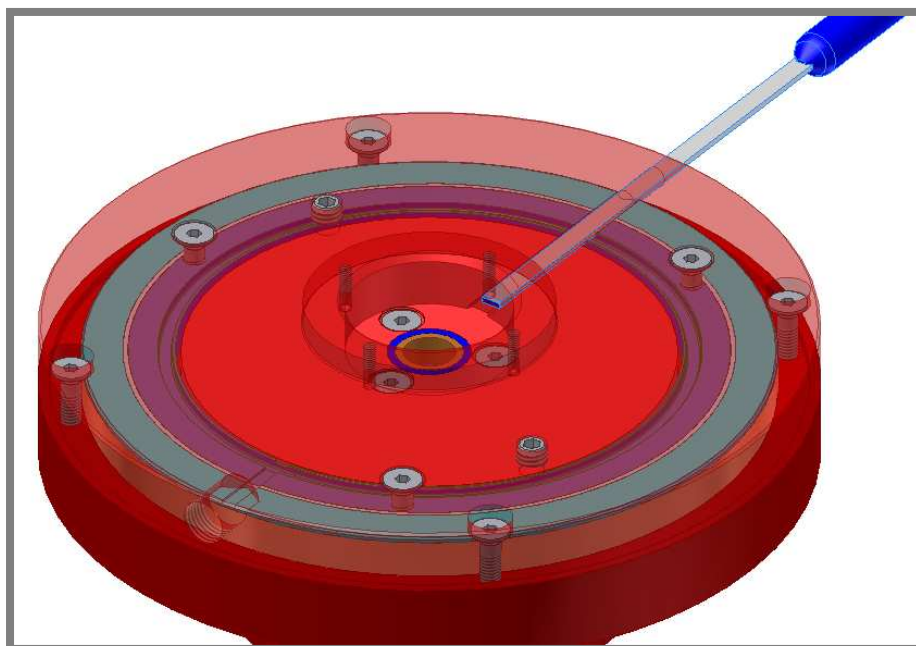
Na roztečné kružnici o průměru 137,5 mm je vytvořena čtveřice děr podle ČSN EN ISO 15065, kterými budou procházet šrouby spojující pravou a levou část

statoru a v podstatě tak spojovat celou sestavu do jednoho celku. Jelikož mezi těmito součástmi nedochází k přenosu krouticího momentu, nemusí být šroubové spojení pevnostně kontrolováno.



Obr. 7.21 Poloha sondy STBX-0201 magnetometru ve spojce.

Na obvodové (rotační) ploše součásti jsou vytvořeny dva otvory, kterými bude možné do pracovního prostoru spojky zasunout sondy magnetometru. První sonda s označením STBX-0201 má pracovní část vysokou 0,3 mm. To znamená, že ji lze do 0,5 mm široké pracovní MR mezery volně vsunout. Bohužel je pracovní část této sondy velice krátká (27 mm). Není tak možné proměřit magnetickou indukci v jednom měření. Je nutné sondu opatrně ohnout do otvoru pro výstupní hřídel a měřit při druhém měření magnetickou indukci z druhé strany. To je taktéž jeden z důvodů, proč byl v místě připojení výstupní hřídele vytvořen tak velký otvor.

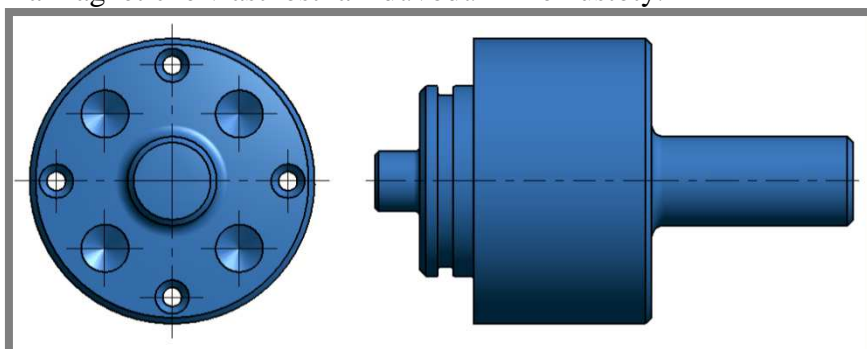


Obr. 7.22 Poloha sondy STD 18-0404 magnetometru ve spojce.

Pracovní část druhé sondy s označením STD18-0404 je již dostatečně dlouhá (101 mm). Problémem pro tento případ je síla pracovní části sondy, která je 0,7 mm. Aby bylo možné provést měření uvnitř 0,5 mm široké MR mezery, je nutné na vnitřní straně pravé části statoru vyrobít drážku pro tuto sondu. Poté již bude možné sondu do těla spojky volně zasunout. Tímto způsobem poté dochází k zvýšení šířky vzduchové mezery mezi rotorovou lamelou a pravou částí statoru. Kvalitní měření by tedy mělo zahrnovat společné vyhodnocení výsledků získaných měření oběma sondami.

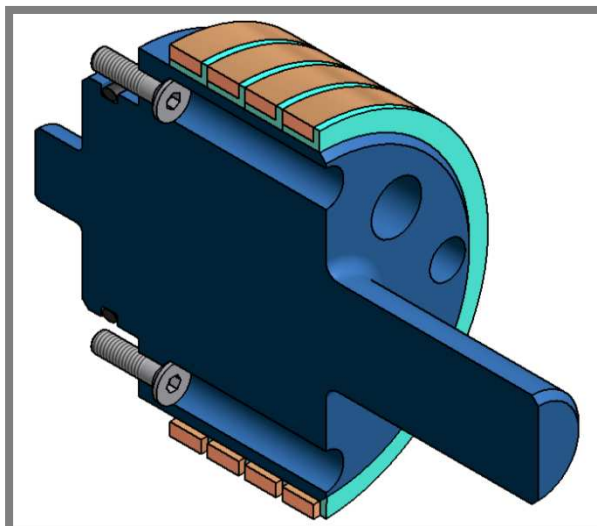
7.3.5 Statorová hřídel

Statorová hřídel zprostředkovává přenos výstupního krouticího momentu. Hřídel je vyrobena z hliníkové slitiny EN AW-2030 T4. Tento materiál byl zvolen s ohledem na magnetické vlastnosti a z důvodů nízké hustoty.



Obr. 7.23 Statorová hřídel.

Konec hřídele má stejný průměr jako rotorová hřídel tj. 15 mm. Součást je odlehčena čtyřmi dírami o průměru 8 mm. Osazení součásti má průměr 48 mm a je 30 mm dlouhé. Bylo takto protaženo z důvodu možnosti umístění sběracích kroužků.



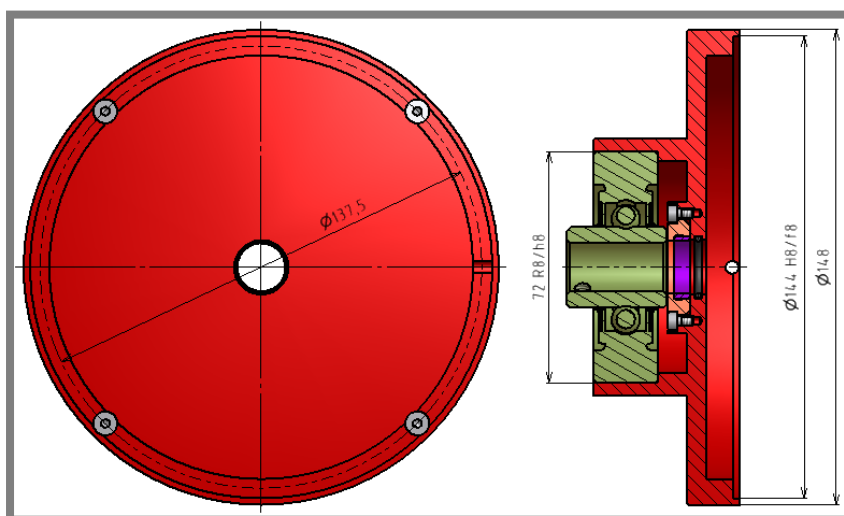
Obr. 7.24 Pohled na konstrukční uzel statorové hřídele.

V případě jiného použití MR spojky než jen k testování životnosti MR kapalin (při kterém se statorová část neotáčí) bude možné na osazení statorové hřídele nasunout sběrací kroužky. Elektrický proud k elektromagnetické cívce bude přenášen přes uhlíky (kartáčky). Rozměry osazení byly uzpůsobeny tomu, aby bylo možné jako sběrací kroužky použít měděnou trubku 54x2 (EN 13348). Bude tak ekonomicky hospodařeno s materiálem.

7.3.6 Levá část statoru

7.3.6

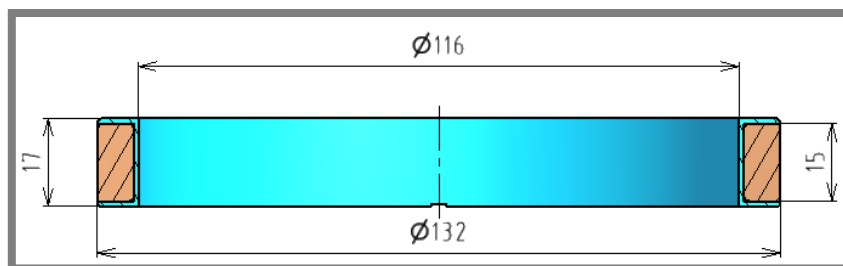
Levá část statoru je součást, která v konstrukci plní funkci statorové lamely a vnějšího obalu. Z tohoto důvodu je součást vyrobena z feromagnetické oceli 11 503 (S355J2G3). Hlavním dalším úkolem této součásti je upevnění ložiskové jednotky UCC 202. Ložisková jednotka je v levé části statoru nalisována. Pro lisované spojení bylo zvoleno uložení se zaručeným přesahem (MIN 0,01; MAX 0,09).



Obr. 7.25 Pohledy na konstrukční uzly levé části statoru.

Na vnitřní straně levé části statoru jsou na roztečné kružnici o průměru 137,5 mm vytvořeny čtyři závity M4. Do těchto závitů jsou zašroubovány šrouby, které uzavírají a spojují celou konstrukci MR spojky.

7.3.7 Elektromagnetická cívka



Obr. 7.26 Řez sestavou elektromagnetické cívky.

Z výpočtu magnetického obvodu (kapitola 6.2) vyplývá, že elektromagnetická cívka bude tvořena 65 závity, jimiž bude procházet proud 0,9 A. Cívka je navinuta na tenkém plastovém rámečku z materiálu MaPA. Průměr drátu byl zvolen na 1 mm. Bylo tak učiněno zejména kvůli možnosti zatížení elektromagnetické cívky vyšším než nominálním proudem.

$$d_d = 1 \text{ mm}$$

$$S_d = \pi \frac{d_d^2}{4} = \pi \cdot \frac{1^2 \text{ mm}^2}{4} = 0.79 \text{ mm}^2 \quad (95)$$

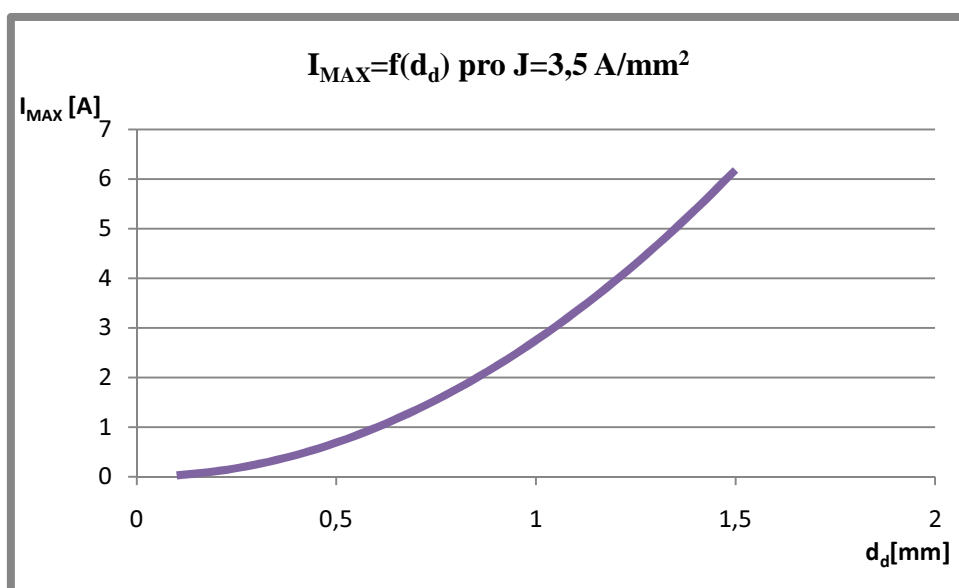
$$J_{MAX} = 3,5 \text{ A mm}^{-2}$$

$$I_{MAX} = J_{MAX} S_d = 3,5 \text{ A mm}^{-2} \cdot 0.79 \text{ mm}^2 = 2,75 \text{ A} \quad (96)$$

kde:

d_d	mm	- průměr drátu cívky
S_d	mm ²	- plocha průřezu drátu cívky
J_{MAX}	A mm ⁻²	- maximální proudová hustota
I_{MAX}	A	- maximální proud na závitě cívky

Z výpočtu vyplývá, že cívku je možno zatížit téměř trojnásobným proudem než je proud nominální. Bude tedy prostor pro korekce nelinearit rozložení magnetické indukce po průřezu spojky a nepřesností výpočtů. Závislost maximálního proudu v drátu elektromagnetické cívky na jeho průměru je na obrázku



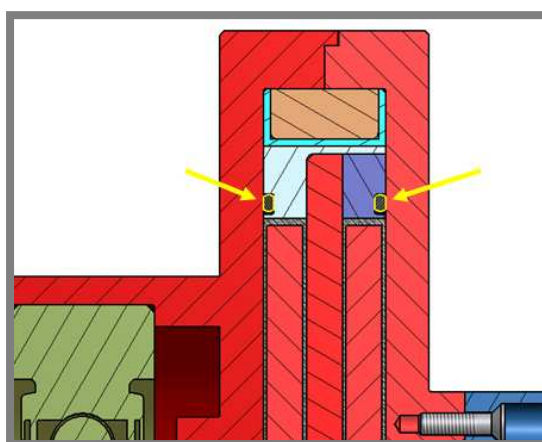
Obr. 7.27 Graf závislosti maximálního proudu na průměru drátu elektromagnetické cívky pro proudovou hustotu $3,5 \text{ a/mm}^2$.

Polyuretanová izolace drátu je schopna odolat teplotě 210°C .

7.4 Těsnění MR spojky

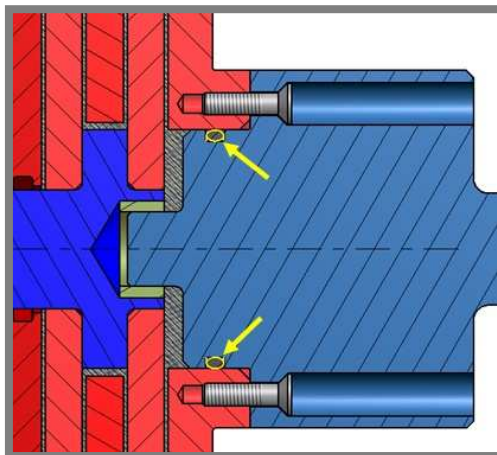
7.4

Jelikož pracovním médiem MR spojky je tekutina, je nutné zabránit jejímu unikání do okolí. V dosud realizovaných konstrukcích MR spojek a brzd (kapitola 2) se většinou pro zatěsnění pracovního prostoru používají o-kroužky, x-kroužky, plochá pryžová těsnění nebo hřídelové těsnící kroužky (gufera). Mezi součástmi, které nejsou ve vzájemném pohybu, byly pro utěsnění pracovního prostoru použity o-kroužky. Na vnějším okraji, tedy mezi rámečkem a levou částí statoru a příložkou a pravou částí statoru byly použity o-kroužky 98x2 NBR 70 (DIN 3770). Těsnění probíhá v axiálním modu, je tedy těsněn prostor mezi dvěma rovinami. Drážky byly vyrobeny podle normy ISO 3601 pro axiální (statickou) instalaci s vnitřním tlakem.



Obr. 7.28 Těsnění na vnějším obvodu pracovního prostoru.

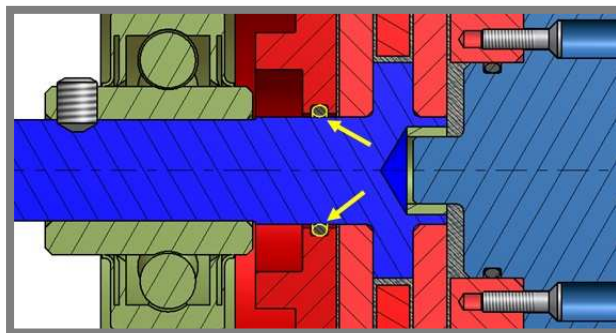
U výstupní hřídele byl použit rovněž o-kroužek, 28x2 NBR 70 (DIN 3770). Z důvodů snadnější vyrobitelnosti bylo rozhodnuto o těsnění vnějším průměrem. To znamená, že drážka pro o-kroužek byla vyrobena podle normy ISO 3601 pro radiální (statickou) instalaci s vnitřním tlakem na válcové ploše statorové hřídele.



Obr. 7.29 Těsnění pracovního prostoru u statorové hřídele.

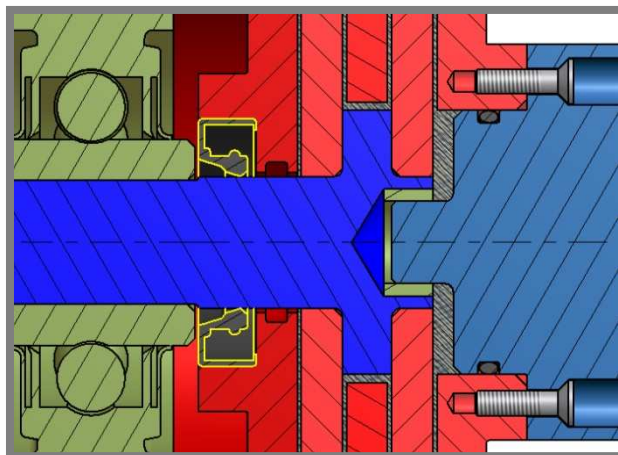
U vstupní hřídele jsou na těsnost pracovního prostoru kladeny největší nároky. Je tomu tak proto, že zde dochází k těsnění prostoru mezi dvěma součástmi, které jsou ve vzájemném rotačním pohybu. Je možné pracovní prostor těsnit pomocí tří různých způsobů.

Prvním ze způsobů je použití o-kroužku. V tomto případě bylo rozhodnuto o tom, že se použije vnitřní průměr těsnění. Byl použit kroužek 16x2 NBR 70 (DIN 3770). Drážka pro kroužek byla vyrobena podle normy ISO 3601 pro radiální (dynamickou) instalaci s vnitřním tlakem.



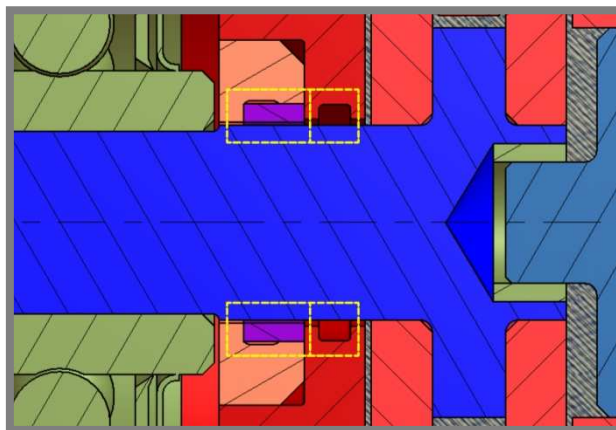
Obr. 7.30 Těsnící pracovního prostoru u vstupní hřídele.

Druhým způsobem jak těsnit pracovní prostor v tomto místě je pomocí hřídelového těsnicího kroužku (gufera). V tomto případě by mohlo být použito hřídelové těsnění G 16-30-7 NBR ČSN 02 9401.0. Těsnění zapadne do vybrání v levé části statoru.



Obr. 7.31 Těsnění pracovního prostoru hřídelovým těsněním.

Třetím způsobem jak těsnit pracovní prostor MR spojky je použití magnetického těsnění. Tento způsob těsnění byl poprvé navrhnut v roce 2010 Senkal (kapitola 2.5.4).

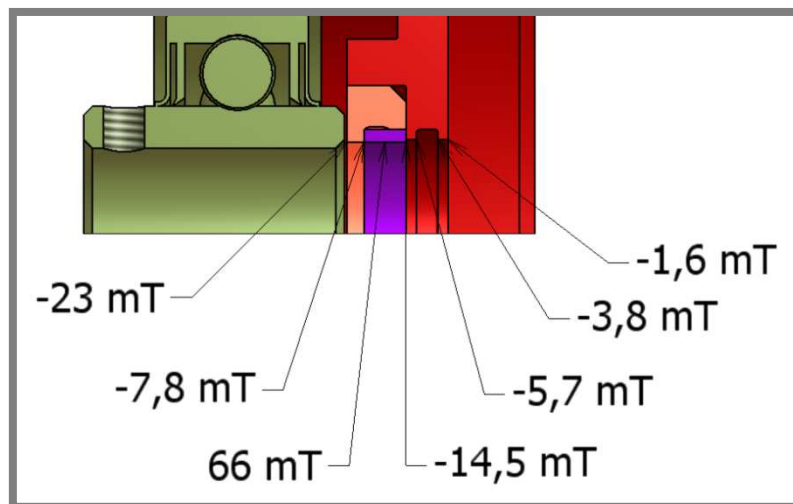


Obr. 7.32 Detail magnetického těsnění.

Magnetické pole vytvořené prstencovým permanentním magnetem (na Obr. 7.31 zvýrazněn fialovou barvou) bude procházet po trase (na Obr. 7.31 znázorněna přerušovanou žlutou čarou) MR spojkou. Ve třech místech bude procházet přes prostor s MR kapalinou. V těchto místech bude docházet k MR efektu a tedy ke ztuhnutí kapaliny. Ta tak vlastně zatěsní sama sebe.

Ve článku podle Senkala (kapitola 2.5.4) nebylo uvedeno vyhodnocení funkčnosti tohoto těsnění. Bylo tedy nutné provést několik experimentů. První z nich zahrnoval měření pole použitého permanentního magnetu NdFeB 19,5x16,5x5 P. Jelikož prodejce permanentního neodimového magnetu neudával velikost magnetické indukce a její distribuci okolo magnetu muselo být provedeno její měření (Příloha II). Změření vyplývá, že by magnetické pole vytvořené permanentním magnetem mělo být dostatečné pro vyvolání MR efektu.

V druhém experimentu byla měřena magnetická indukce permanentního magnetu instalovaného do pravé části statoru.



Obr. 7.33 Velikost magnetického pole v dutině rotorové hřídele.

Hodnoty tohoto měření jsou velice nízké. Je to způsobeno vysokým magnetickým odporem vzduchu při nepřítomnosti rotorové hřídele. Z tohoto důvodu byla provedena experimentální zkouška funkčnosti magnetického těsnění (Příloha III), ze které vyplývá, že by magnetické těsnění mělo fungovat správně.

Po zvážení všech možností a po provedení měření a experimentů bylo rozhodnuto o použití magnetického těsnění pro těsnění pracovního prostoru u vstupní hřídele.

Pro ověření těsnosti zařízení byla spojka zkušebně naplněna (Příloha IV).

7.5 Montáž

Montáž spojky probíhá v několika krocích. Nejprve je sestavena podsestava statorové části. Statorová lamela a příložka je zasunuta do dutiny rámečku. V druhém kroku je k osazení na rotorové hřídeli přišroubována jedna z rotorových lamel. Poté je hřídel vsunuta do otvoru ve statorové lamelě. Přišroubováním i druhé rotorové lamely k osazení hřídele jsou součásti spojeny do jednoho celku. Ve třetím kroku je příložka připojena k pravé části statoru a celá sestava je uzavřena spojením pravé a levé části statoru. V posledním kroku je zajištěna vzájemná poloha v axiálním směru mezi rotorovou hřídelí a statorovou částí pomocí stavěcích šroubů (Příloha V).

Rozebrání sestavy probíhá v opačném pořadí. Při dodržení postupu je možné snadno a rychle odebrat vzorky MR kapaliny pro porovnání a další experimenty.

7.6 Experimentální ověření magnetického pole

Před samotným zkoušením funkčnosti MR spojky jako celku bylo potřeba posoudit správnost použitých výpočtů magnetického pole. Pomocí sondy magnetometru proto bylo změřeno rozložení magnetické indukce uvnitř pracovního prostoru spojky. Závislost velikosti magnetické indukce na vzdálenosti od osy otáčení byla zpracována do grafu (Obr. 7.34).



Obr. 7.34 Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti od osy otáčení.

Velikost magnetické indukce B se vzdáleností od osy otáčení v pracovním prostoru MR spojky roste. Maximální naměřená indukce při proudu 1,5 A byla 24 mT. Ve výpočtu bylo počítáno s magnetickou indukcí 350 mT. Rozdíl v naměřených a vypočítaných hodnotách magnetické indukce je způsoben především rozdílem mezi relativní permeabilitou MR kapaliny a vzduchu, šířkou vzduchové mezery při měření, ale i zanedbáním některých částí magnetického obvodu při výpočtu.

$$\Delta_{\mu} = \frac{\mu_{MR}}{\mu_{Vzduch}} = \frac{9,28}{1} 9,28 \quad (97)$$

$$B_{mereno} = 24,1 \text{ mT}$$

$$B_{teor} = 350 \text{ mT}$$

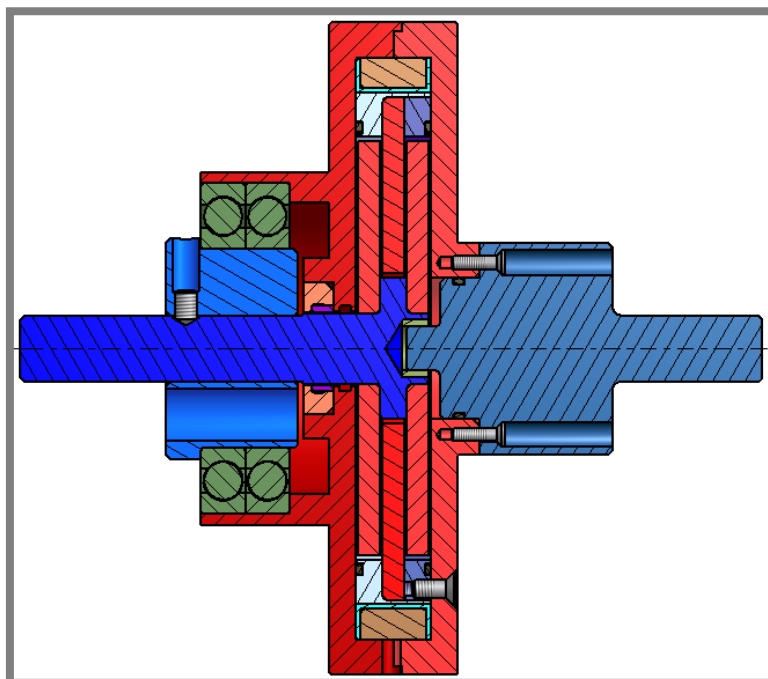
$$\delta = \left| \frac{B_{teor} - (B_{mereno} \Delta_{\mu})}{B_{teor}} \right| 100\% = \left| \frac{350 \text{ mT} - (24,1 \text{ mT} \cdot 9,28)}{350 \text{ mT}} \right| 100 = 36,1\% \quad (98)$$

kde:

Δ_{μ}	[1]	- odchylka relativní permeability MR kapaliny a vzduchu
B_{mereno}	[T]	- naměřená magnetická indukce
B_{teor}	[T]	- teoretická magnetická indukce
δ	[1]	- relativní chyba teoretického magnetického pole

Při měření magnetického pole bylo zjištěno, že v ložiskové jednotce UCC 202 dochází k pohybu mezi upínacím ložiskem a litinovým domkem. Kluzné ložisko nedokázalo zabránit tomuto posuvu (natočení). V sestavě tak docházelo ke kolizi mezi součástmi. Jednalo se o kontakt mezi statorovou a rotorovou lamelou. Pokud by ke kontaktu došlo při práci MR spojky, magnetický tok by neprocházel pracovním prostorem po zamýšlené trajektorii a docházelo by ke ztrátám výkonnosti.

Tato závada byla opravena výměnou ložiskové jednotky za dvojici kuličkových ložisek 16009 a hřídelovou vložku. Do vnitřního průměru ložisek byla nalisována hřídelová vložka a celá sestava byla poté nalisována do levé části statoru (Obr. 7.35).



Obr. 7.35 Konstrukční změna ložiska.

Při dalších experimentech došlo k poškození elektromagnetické cívky. Cívka byla proto nahrazena novou cívkou se 100 závitů lakovaného měděného drátu o průměru 0,8 mm. Při dodržení proudové hustoty $3,5 \text{ A/mm}^2$ je maximální dovolený proud na závitěch této cívky 1,8 A.

Po výměně ložiska a navinutí nové cívky byl pět proveden experiment pro ověření rozložení magnetického pole po průřezu spojky (Obr. 7.36). Maximální naměřená hodnota magnetické indukce (při 1,5 A) byla 36,1 mT. Bereme-li v úvahu relativní permeabilitu MR kapaliny 9,28 je předem možné tvrdit, že MR spojka přenesla krouticí moment 10 Nm.



Obr. 7.36 Graf rozložení magnetické indukce po průřezu MR spojky.

$$B_{\text{mereno2}} = 36,1 \text{ mT}$$

$$B_{MR} = B_{\text{mereno2}} \Delta_{\mu} = 36,1 \text{ mT} \cdot 9,28 = 335,01 \text{ mT} \quad (99)$$

kde:

B_{mereno2}	[T]	- naměřená magnetická indukce
B_{MR}	[T]	- korigovaná magnetická indukce

Změnou intenzity magnetického pole (počtu závitů cívky) se změní i závěrečný výpočet magnetického obvodu. Podle něj by MR spojka měla být schopna přenést krouticí moment 10 Nm při proudu 0,6 A. Z předešlého měření vyplývá, že tato hodnota je velice konzervativní. Je možné očekávat, že MR spojka přeneše Krouticí moment 10 Nm při proudu vyšším než 1,5A.

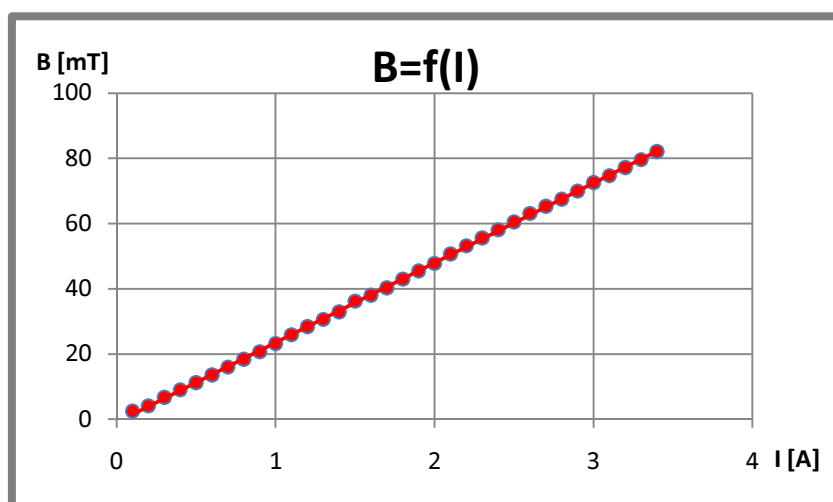
7.7 Hmotnostní rozvaha

Vzhledem k experimentálnímu charakteru konstrukce byla u některých součástí zohledněna i možnost magnetického sycení. Konstrukce magnetického obvodu byla proto částečně naddimenzována a došlo tak ke zvýšení hmotnosti sestavy.

Tabulka 7.1 Hmotnostní rozvaha.

Název součásti	Hmotnost [kg]
LEVÁ ČÁST STATORU	1,276
PRAVÁ ČÁST STATORU	1,004
STATOROVÁ HŘÍDEL	0,162
ROTOROVÁ HŘÍDEL	0,052
STATOROVÁ LAMELA	0,361
ROTOROVÁ LAMELA	0,261
RÁMEČEK	0,061
PŘÍLOŽKA	0,044
OBAL CÍVKY	0,009
CÍVKA	0,369
DISTANČNÍ HŘÍDEL	0,130
POUZDRO MAGNETU	0,022
BRONZOVÉ POUZDRO	0,003
SPOJOVACÍ MATERIÁL	0,027
Celkem	3,781

V úvaze nad snížením hmotnosti spojky je nutné brát v úvahu magnetické sycení. Byl proto proveden experiment pro ověření lineárního průběhu magnetického sycení konstrukce. Měření bylo zaznamenáno do grafu (Obr. 7.37).



Obr. 7.37 B-I křivka.

B-I křivka má lineární charakter, je proto možné v budoucnosti přistoupit ke konstrukčním úpravám vedoucím ke snížení hmotnosti sestavy. Efektivním řešením by bylo například vytvoření několika drážek (žebrování) na pravé a levé části statoru. Tato konstrukční úprava by tak současně napomáhala při chlazení celého zařízení.

Takto upravená spojka by poté mohly být součástí jednotky pro trvanlivostní zkoušky MR kapaliny (Příloha VI)

7.8 Zkušební provoz

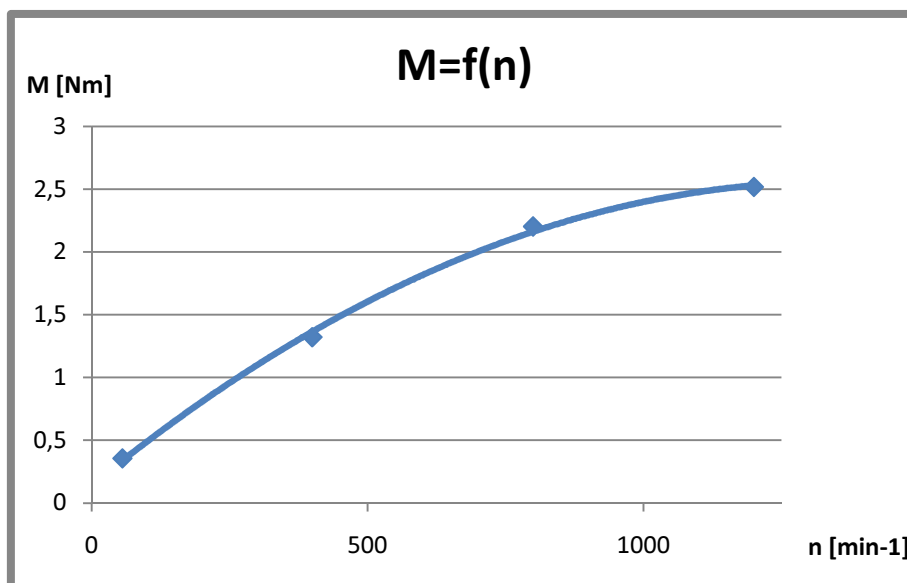
7.8

Funkčnost MR spojky byla experimentálně otestována na improvizovaném zařízení v dílně ÚK. Rotorová hřídel byla upnuta do univerzálního sklíčidla soustruhu. Na statorovou hřídel bylo nasunuto bronzové pouzdro, a to bylo upnuto do sklíčidla na koníku. Do otvoru pro sondu magnetometru byla našroubována závitová tyč o délce 990 mm. Celkové rameno síly tak dosahovalo 1059 mm. Volný konec závitové tyče byl umístěn na digitální váhu.



Obr. 7.38 Improvizovaná sestava pro měření krouticího momentu.

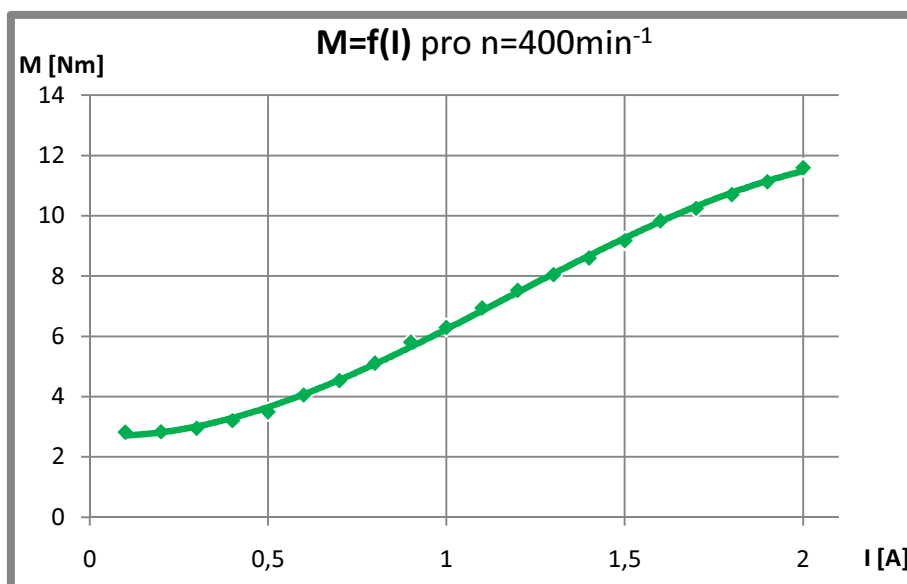
V první experimentu bylo testováno, jaký krouticí moment je přenášen nenaplněnou MR spojkou. Cílem tedy bylo odhalit, jak velký moment je způsobován třením v ložiscích.



Obr. 7.39 Graf závislosti momentu způsobeného třením v ložiscích na otáčkách rotorové hřídele.

Moment způsobený odporem v ložiscích je znatelný. Je pravděpodobně způsoben tím, že ložiska nebyla dosud řádně zaběhnutá, tím, že byla naplněna velkým množstvím plastického maziva a úlohu hrálo jistě i tření v bronzovém pouzdře.

Druhý experiment už zapojil do měření účinky MR kapaliny. Nejprve byla měřena momentová charakteristika MR spojky, tedy závislost přeneseného krouticího momentu na proud.

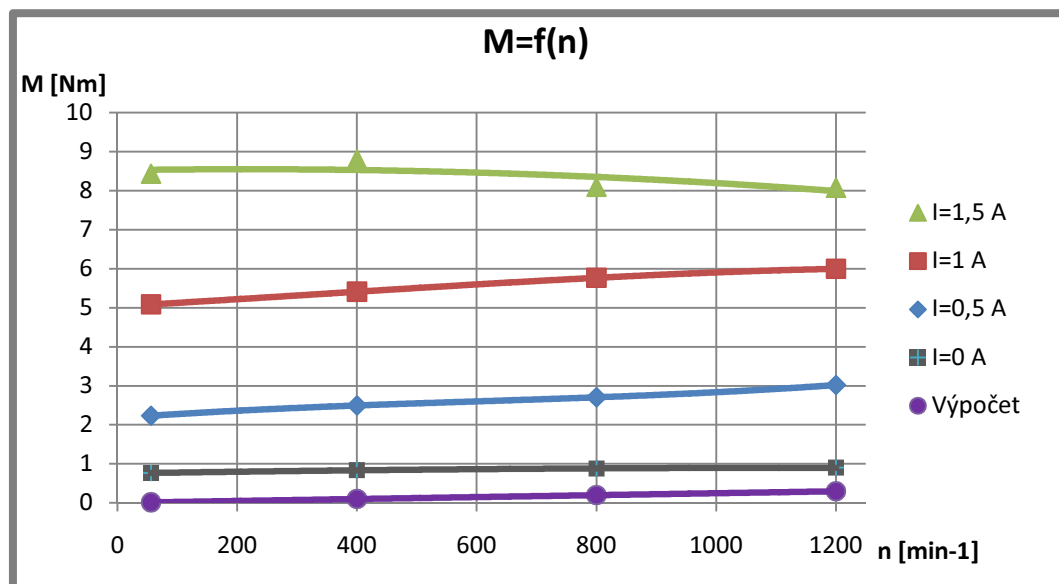


Obr. 7.40 Momentová charakteristika spojky pro $n=400 \text{ min}^{-1}$.

Tvar momentové charakteristiky spojky je shodný s naměřenými charakteristikami pro ostatní zařízení popsané v řešební části (Kapitola 2). Pro proudy od 0,5 A do 1,5 A má momentová charakteristika lineární průběh. Dle výpočtu s korigovanou magnetickou indukcí (99) by měla MR spojka přenést krouticí moment 10 Nm při proudu asi 1,5 A. Vezmeme-li v úvahu tření v ložiscích

a nerovnoměrné rozložení magnetické indukce v pracovní oblasti spojky, výsledky momentové charakteristiky tuto tezi potvrzují.

Třetí experiment se zaměřoval na ověření charakteru průběhu krouticích momentů v závislosti na otáčkách vstupní (rotorové) hřídele.



Obr. 7.41 Graf závislosti krouticího momentu na otáčkách.

Růst hodnot krouticího momentu pro dané proudy je způsoben viskozitním krouticím momentem (krouticí moment způsobený viskozitou MR kapaliny v neaktivovaném stavu). Výpočtová (ideální hodnota) viskozitního momentu MR kapaliny LORD 140 CG je v grafu (Obr. 7.41) znázorněna fialovou přímkou. V ideálním případě by měly mít i ostatní křivky tvar polynomu prvního stupně (přímky), navíc by všechny křivky měly být rovnoběžné. Zejména pro proud 1,5 A dochází ke značným odchylkám od matematického modelu. Tato chyba je zde způsobena rychlým zahříváním MR kapaliny a tedy i určitým poklesem viskozity.

POZNÁMKA

Při měření krouticího momentu byla zanedbána pružná deformace závitové tyče.

7.9 Ekonomická rozvaha

Součásti sestavy MR spojky byly vyrobeny v dílně ÚK. Výroba zabrala 102 hodin. Cena materiálu je shrnuta v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2 Ekonomická rozvaha

Materiál	Cena [Kč]
Hutní materiál + dělení	2487
Ložisková jednotka UCC 202	420
Permanentní magnet	124
Cu drát	146
O-kružky	27
Spojovací materiál	70
Ložiska 16009	150
Celkem	3424

8. ZÁVĚR

Byla zkonstruována, vyrobena, sestavena a otestována MR spojka s axiální MR mezerou. Jedná se o unikátní zařízení první svého druhu v České republice, druhá nekomerční konstrukce v Evropě. Při konstrukčním řešení bylo ke spojkce přistupováno jako k experimentálnímu zařízení, s potenciálem pro trvanlivostní zkoušky MR kapalin, čemuž odpovídaly zvolené materiály a postupy.

Během řešení diplomové práce bylo provedeno několik experimentů, z nichž jako nejhodnotnější považuji experimentální (statické a dynamické) ověření funkčnosti magnetického těsnění, vyvození závěrů o rozložení magnetické indukce uvnitř pracovního prostoru a změření momentové charakteristiky spojky.

Z prvního uvedeného experimentu lze vyvodit, že těsnění rotačních MR zařízení lze provést použitím magnetického těsnění.

Závěrem experimentálního ověření magnetického pole a měřením momentové charakteristiky spojky lze uvést, že zvolený (a dle rešeršní části používaný) postup výpočtu magnetického obvodu rotačních MR zařízení podává pouze rámcovou informaci o výsledném krouticím momentu. Při výpočtovém proudu 0,6 A spojka přenášela 4 Nm. Pro dosažení požadovaného krouticího momentu 10 Nm bylo nutné zvýšit proud na 1,7 A (volba druhu drátu vinutí i v tomto případě zajišťuje funkčnost, aniž by došlo k překročení hodnoty maximální proudové hustoty). Do budoucna je z tohoto důvodu vhodné použít pro výpočty magnetického obvodu některý MKP software.

V kapitole 7 byly rovněž navrhнутy hlavní konstrukční vylepšení (kvalitnější materiál pro rotorovou a statorovou hřídel, žebrování statorové části), kterými lze dosáhnout vyšší výkonnosti MR spojky.

MR spojka byla otestována na improvizovaném zařízení a označena za funkční.

9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Structural Dynamics and Applied Control* [online]. 2007 [cit. 2011-05-08]. Projects. Dostupné z WWW: <<http://sdac.kaist.ac.kr/projects/>>.
 - [2] NOVÁČEK, V. *Technologie výroby Magnetoreologických kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.
 - [3] CHOI, H. J., PARK, B. J., CHO, M. S., YOU, J. L., *Core-shell structured poly(methyl methacrylate) coated carbonyl iron particles and their magnetorheological characteristics*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, March 2007, vol. 310, no. 2, s. 2835-2837
 - [4] ULICNY, J. C., MANCE, A. M., *Evaluation of electroless nickel surface treatment for iron powder used in MR fluids*, *Materials Science and Engineering A*, March 2004, vol.369, no.1-2, s. 309-313
 - [5] T.E.A. *TECHNIK s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2011-05-08]. Svěrná pouzdra. Dostupné z WWW: <<http://www.teatechnik.cz/tlk-130/>>
 - [6] *VBX Ball Bearings* [online]. 2010 [cit. 2011-05-08]. FYH Bearing UCC202-10. Dostupné z WWW:<<http://www.vxb.com/page/bearings>>.
 - [7] LAMPE, D., THESS, A., DOTZAUER, C., *MRF - Clutch - Design considerations and performance*, Dresden University of Technology, 1998, Dresden Germany.
 - [8] CARLSON, J. D. Critical factors for MR fluids in vehicle systems. *International Journal of Vehicle Design*. 2003, 33, 1-3, s. 207-217.
 - [9] KAVLICOGLU, B. M., et al. Heating of a High-torque magnetoreological fluid limited slip differential clutch. *Journal of intelligent material systems and structures*. 2008, 19, s. 235-241.
 - [10] KAVLICOGLU, B. M., et al. A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch, *Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego. 2002.
 - [11] KAVLICOGLU, B. M., et al. A multi-plate magneto-rheological fluid limited slip diferenciál clutch. *Smart structures and materials*. 2003, 5054, s. 341–349.
 - [12] SMITH, A. L.; ULICNY, J. C.; KENNEDY, L. C. Magnetorheological Fluid Fan Drive for Trucks. *Journal of intelligent material systems and structures*. 2007, 18, s. 1131-1135.
 - [13] Bose, H., et al. Magnetorheological clutch with reverse torque transmission behavior Actuator, *11th international conference of new actuators*, 2008.
-

- [14] LIU, B, et al. Development of an MR-brake-based haptic device. *Smart materials and structures*. 2006, 15, s. 1960-1966.
 - [15] DEMERSSEMAN, R., et al. Magnetorheological Brake for Haptic Rendering. *EuroHaptics*. 2008, 5054, s. 941-945.
 - [16] LORD RD-2087-01 Rotary Brake, LORD Data Sheet, 2006.
 - [17] KIKUCHI, T, et al. Compact MR fluid clutch device for human-friendly actuator. *Journal of Physics*. 2009, 149, s. 12-59.
 - [18] SENKAL, D; GUROCAK, H. Serpentine flux path for high torque MRF brakes in haptics applications. *Mechatronics*. 2010, 20, s. 377–383.
-

10. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam použitých zkratek

MR	- magnetoreologický
CI	- karbonylové železo
IUT	- provozní houstnutí (In Use Thickening)
LDE	- parametr disipace energie
MKP	- metoda konečných prvků
TVR	- poměr krouticího momentu a zástavbového objemu (Torque to Volume Ratio)
ÚK	- Ústav Konstruování

Seznam symbolů a veličin

τ	[MPa]	- smykové napětí
τ_0	[MPa]	- mez kluzu
η	[Pa · s]	- dynamická viskozita
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	- smykový spád
ω_1	[rad s ⁻¹]	- úhlová rychlost prvního disku
ω_2	[rad s ⁻¹]	- úhlová rychlost druhého disku
LDE	[J cm ⁻³]	- parametr LDE (life dissipated energy)
P	[W]	- výkon zařízení
V	[m ³]	- objem MR kapaliny v zařízení
Bi	[1]	- Biotovo číslo
Q	[J]	- dodané teplo
W	[J]	- vykonaná práce
U	[J]	- vnitřní energie
t	[s]	- čas
I	[A]	- proud
B	[T]	- magnetická indukce
Φ	[Wb]	- magnetický tok
z	[1]	- počet závitů cívky
H	[A m ⁻¹]	- intenzita magnetického pole
μ_0	[H m ⁻¹]	- permeabilita vakua
μ_{ocel}	[H m ⁻¹]	- permeabilita oceli
μ_{MR}	[H m ⁻¹]	- permeabilita MR kapaliny
D_0	[m]	- vnitřní průměr pracovní MR mezery
D_1	[m]	- vnější průměr pracovní MR mezery
R_0	[m]	- vnitřní poloměr pracovní MR mezery
R_1	[m]	- vnější poloměr pracovní MR mezery
S	[m ²]	- obsah plochy mezikruží pracovní MR mezery
M_{celk}	[Nm]	- celkový krouticí moment (ze zadání)
M_{MR}	[Nm]	- krouticí moment na MR mezeru
R_M	[H ⁻¹]	- magnetický odpor
l_{lam}	[m]	- šířka lamely (volený rozměr)
M	[Nm]	- krouticí moment
$L_{10,h}$	[hod]	- životnost ložiska s pravděpodobností poruchy 10%
f_z	[1]	- součinitel tření v závitu

f_{AlOcel}	[1]	- součinitel tření mezi hliníkovou slitinou a ocelí
k_n	[1]	- návrhový součinitel
F_i	[N]	- síla předpětí závitu šroubu
p_z	[MPa]	- tlak v závitech
R_{cz}	[μm]	- výška nerovnosti povrchu čepu
R_{nz}	[μm]	- výška nerovnosti povrchu díry
E	[MPa]	- modul pružnosti oceli
μ	[1]	- Poissonovo číslo
J_{MAX}	[A mm^{-2}]	- maximální proudová hustota

11. SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 X-by-Wire [1]	13
Obr. 2.1 Částice klasické struktury z CI (vlevo), kompozitní částice Fe-Ni vpravo) [3,4]	14
Obr. 2.2 Schematický náčrt funkčního řetězce MR spojky s axiální mezerou [7].	15
Obr. 2.3 Schématický náčrt funkčního řetězce MR spojky s radiální mezerou [7].	17
Obr. 2.4 Graf závislosti síly v neaktivovaném stavu na počtu cyklů (čase) [8].	19
Obr. 2.5 Řez spojkou dle Kavlicogluovy konstrukce [10].	22
Obr. 2.6 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od osy otáčení [10].	23
Obr. 2.7 Zkušební řetězec MR spojky [10].	25
Obr. 2.8 Grafy závislosti krouticího momentu na proudu pro MR kapaliny UNR-MRPG (vlevo) a LORD-MRF132LD (vpravo) [10].	25
Obr. 2.9 Řez MR spojkou podle konstrukce Kavlicoglu [11].	26
Obr. 2.10 Testovací řetězec podle Kavlicoglu [11].	27
Obr. 2.11 Náčrt řezu MR spojky Smithovy konstrukce [12].	28
Obr. 2.12 Schématický nákres MR spojky Boseho konstrukce [13].	29
Obr. 2.13 Graf závislosti intenzity magnetického pole na poloměru spojky [13].	30
Obr. 2.14 Graf závislosti smykového napětí na intenzitě magnetického pole [13].	30
Obr. 2.15 Obrázek testovacího řetězce [13].	30
Obr. 2.16 Obrázek testovacího řetězce [13].	31
Obr. 2.17 Řez MR brzdou Liovy konstrukce [14].	31
Obr. 2.18 Řez MR brzdou Demerssemanovy konstrukce [15].	32
Obr. 2.19 Komerční MR brzda LORD [16].	33
Obr. 2.20 Schématický nakres Kikuchiho konstrukce MR spojky [17].	34
Obr. 2.21 Řez MR spojkou Kikuchiho konstrukce [17].	35
Obr. 2.22 Graf závislosti krouticího momentu na proudu [17].	35
Obr. 2.23 Graf znázorňující rychlost odezvy [17].	36
Obr. 2.24 Řez MR spojkou Senkalovy konstrukce [18].	37
Obr. 2.25 FeroKapalinové těsnění [18].	37
Obr. 2.26 Testovací řetězec MR spojky [18].	38
Obr. 6.1 Řez MR spojkou s jednou rotorovou lamelou.	44
6.2 Detail řezu MR spojkou s jednou rotorovou lamelou.	45
Obr. 6.3 B-H křivka MR kapaliny LORD 140 CG.	47
Obr. 6.4 Magnetická smyčka pracovní oblastí.	49
Obr. 6.5 Graf závislosti smykového napětí na intenzitě magnetického pole pro MR kapalinu LORD 140 CG	50
Obr. 6.6 B-H křivka MR kapaliny LORD 140 CG.	50
Obr. 6.7 Magnetické smyčky průřezem MR spojky	52
Obr. 7.1 Rozpad sestavy MR spojky – perspektiva.	55
Obr. 7.2 Detail řezu MR spojkou s velkým rezervoárem MR kapaliny.	57
Obr. 7.3 Detail MR mezery.	57
Obr. 7.4 Rozpad rotorové části	58
Obr. 7.5 Řez spojkou s KM maticí MB podložkou.	58
Obr. 7.6 Samostředící svěrné pouzdro [5]	59
Obr. 7.7 Ložisková jednotka UCC202[6]	59
Obr. 7.8 Detail řezu s ložiskovou jednotkou UCC202.	60
Obr. 7.9. Detail šroubového spoje rotorové části	61

Obr. 7.10 Detail řezu rotorovou částí	62
Obr. 7.11 Detail řezu rotorovou částí.	65
Obr. 7.12 Rozpad statorové část – pohled perspektiva.	65
Obr. 7.13 Detail řezu MR spojkou	66
Obr. 7.14 Statorová lamela s čepy.	66
Obr. 7.15 Detail nalisovaného spojení čepu a statorové lamely.	67
Obr. 7.16 Rámečky pohledy a řezy.	69
Obr. 7.17 Pohled, řezy příložka.	70
Obr. 7.18 Pohledy na pravou část statoru.	71
Obr. 7.19 Detail spojení statorové hřídele a pravé části statoru.	72
Obr. 7.20 Řez spojkou s teploměrem.	74
Obr. 7.21 Poloha sondy STBX-0201 magnetometru ve spojce.	75
Obr. 7.22 Poloha sondy STD 18-0404 magnetometru ve spojce.	76
Obr. 7.23 Statorová hřídel.	76
Obr. 7.24 Pohled na konstrukční uzel statorové hřídele.	77
Obr. 7.25 Pohledy na konstrukční uzly levé části statoru.	77
Obr. 7.26 Řez sestavou elektromagnetické cívky.	78
Obr. 7.27 Graf závislosti maximálního proudu na průměru drátu elektromagnetické cívky pro proudovou hustotu $3,5 \text{ A/mm}^2$.	79
Obr. 7.28 Těsnění na vnějším obvodu pracovního prostoru.	79
Obr. 7.29 Těsnění pracovního prostoru u statorové hřídele.	80
Obr. 7.30 Těsnící pracovního prostoru u vstupní hřídele.	80
Obr. 7.31 Těsnění pracovního prostoru hřídelovým těsněním.	81
Obr. 7.32 Detail magnetického těsnění.	81
Obr. 7.33 Velikost magnetického pole v dutině rotorové hřídele.	82
Obr. 7.34 Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti od osy otáčení.	83
Obr. 7.35 Konstrukční změna ložiska.	84
Obr. 7.36 Graf rozložení magnetické indukce po průřezu MR spojky.	85
Obr. 7.37 B-I křivka.	86
Obr. 7.38 Improvizovaná sestava pro měření krouticího momentu.	87
Obr. 7.39 Graf závislosti momentu způsobeného třením v ložiscích na otáčkách rotorové hřídele.	88
Obr. 7.40 Momentová charakteristika spojky pro $n=400 \text{ min}^{-1}$.	88
Obr. 7.41 Graf závislosti krouticího momentu na otáčkách.	89

12. SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.3 Změny teplot částí spojky po 10 min intervalu

Tabulka 4.2 Porovnání MR spojek a brzd

Tabulka 7.1 Hmotnostní rozvaha.

Tabulka 7.2 Ekonomická rozvaha

13. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I Pevnostní kontrola rotorové hřídele

Příloha II Měření magnetického pole permanentního magnetu

Příloha III Zkouška funkčnosti magnetického těsnění.

Příloha IV Plnění spojky

Příloha V Montáž spojky

Příloha VI Návrh jednotky pro trvanlivostní testy MR kapalin

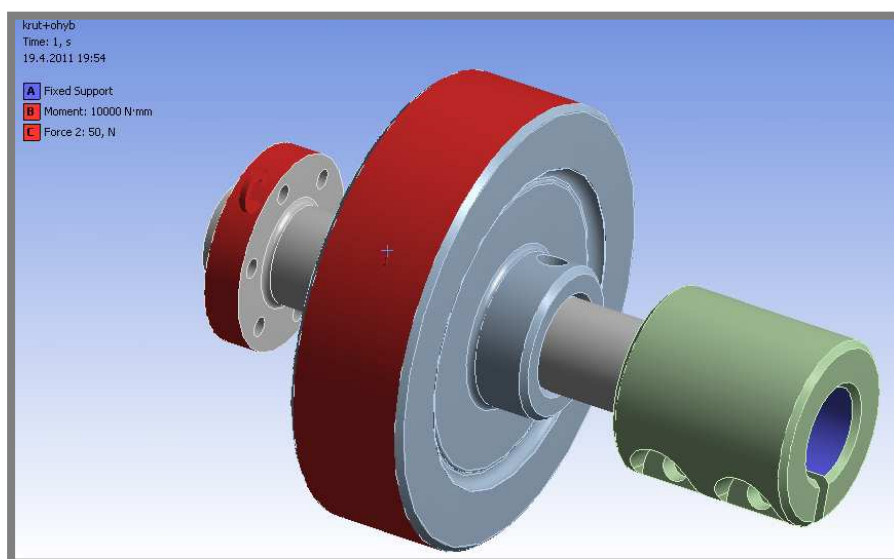
SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY

Příloha I

Pevnostní kontrola rotorové hřídele

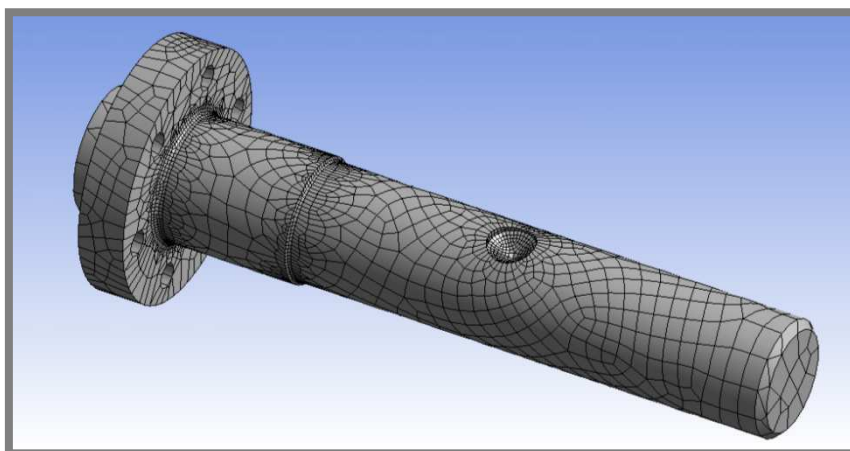
Nejvíce namáhanou součástí sestavy MR spojky je rotorová (vstupní) hřídel. Je proto nutné provést pevnostní kontrolu. Jelikož je hřídel namáhána krutem a ohybem za rotace, je rovněž nutné posoudit životnost hřídele.

Pevnostní napěťová analýza byla provedena v programu Ansys Workbench 12.1. Geometrie byla do programu importována z 3D modelu sestavy MR spojky. Sestava pro pevnostní výpočet sestávala z tří samostatných součástí. Podmínky spojení jednotlivých součástí a způsob jejich zatížení kopíroval skutečné podmínky.



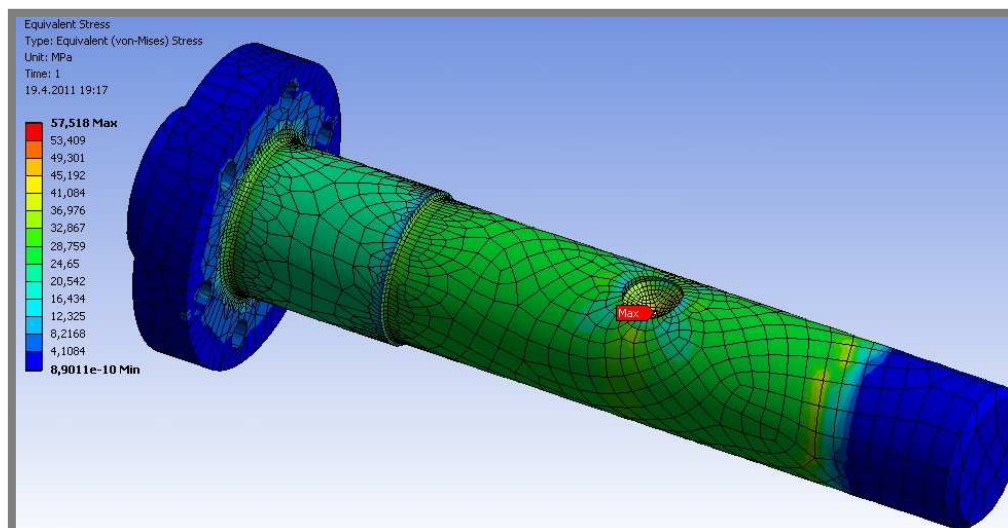
I.1 Okrajové podmínky výpočtové sestavy hřídele.

Pro „meshování“ hřídele byla použita metoda Hex Dominant. Hrany a plochy, u kterých se předpokládala koncentrace napětí, byly zjemněny. Délka hran zjemněných elementů byla nastavena na 0,5 mm. Dalším zjemňováním nebylo dosaženo přesnějších výsledků. MKP model hřídele sestává z 21 739 elementů (67 432 uzlů).



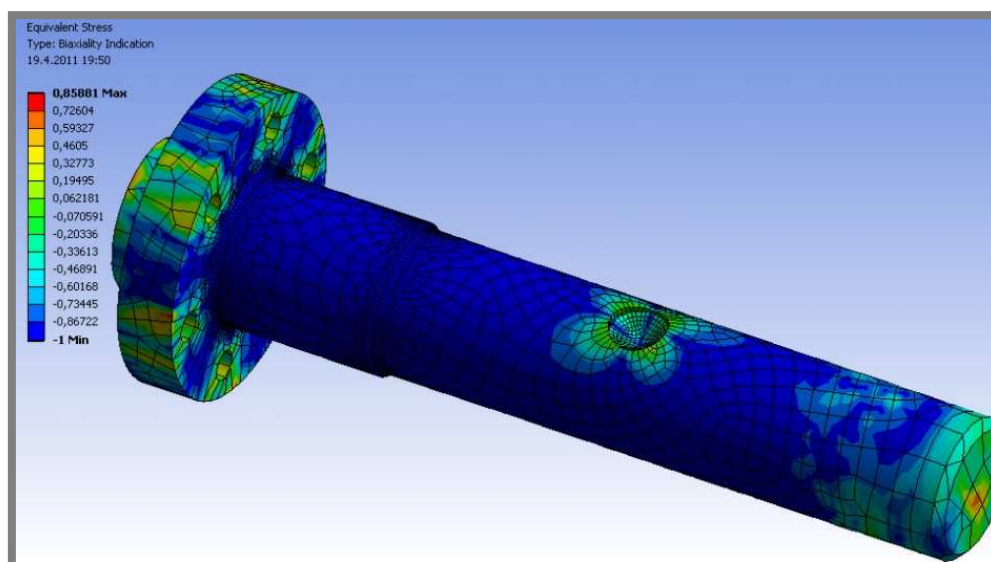
I.2 MKP síť rotorové hřídele.

Hřídel je vyrobena z materiálu EN AW-2030 T4, který má pevnostní charakteristiky: mez pevnosti $R_m=310$ MPa, smluvní mez kluzu $R_{p0,2}=220$ MPa a experimentálně stanovenou mez únavy na 82 MPa. Při kombinovaném namáhání hřídele ohybovým a krouticím momentem vzniká v koncentrátoru maximální redukované napětí (HMH) 57,5 MPa. Toto napětí se v součásti vyskytne za současného působení krouticího momentu a maximálního ohybového momentu.



I.3 Rozložení redukovaného napětí po hřídeli.

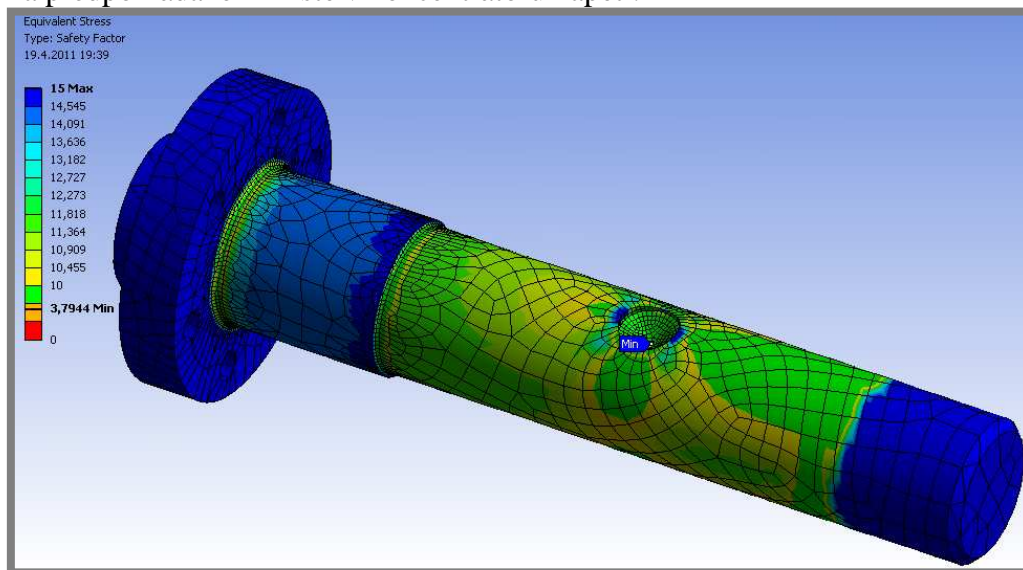
Vzhledem k tomu, že při únavovém namáhání leží hlavní napětí způsobená ohybovým a krouticím momentem v jiných rovinách, dojde k určitému zmírnění účinku napětí na životnost a bezpečnostní součinitel. Z některých publikovaných experimentů vyplívá, že největší vliv na životnost součásti namáhané kombinovaným namáháním má tahové napětí.¹ Míru „biaxiality“ napětí udává Biaxiality factor.



I.4 Biaxiality indication.

¹ CROSSBY, J.R.; BURNS, D.J.; BENHAM, P.P. Effect of stress biaxiality on the high-strain fatigue behavior of an aluminum-copper alloy. *EXPERIMENTAL MECHANICS*. 1968, 9, 7, s. 305-312.

Nejnižší bezpečnostní součinitel vzhledem k mezi únavy materiálu je 3,8 a vyskytuje se na předpokládaném místě v koncentrátoru napětí.



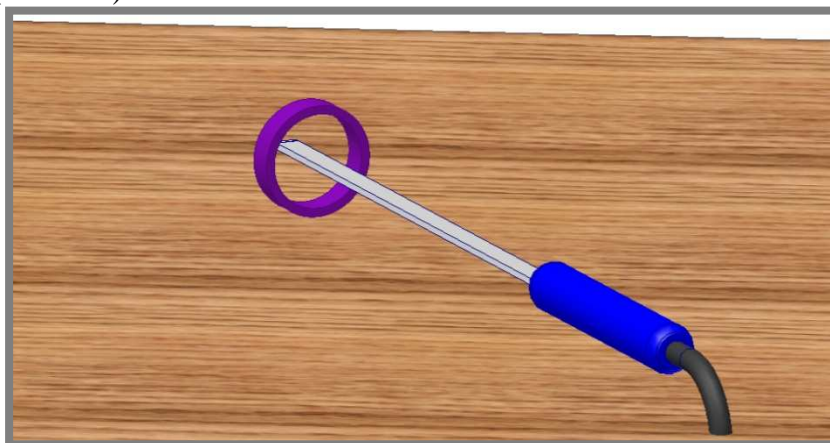
I.5 Součinitel bezpečnosti vzhledem k nekonečné životnosti.

Příloha II

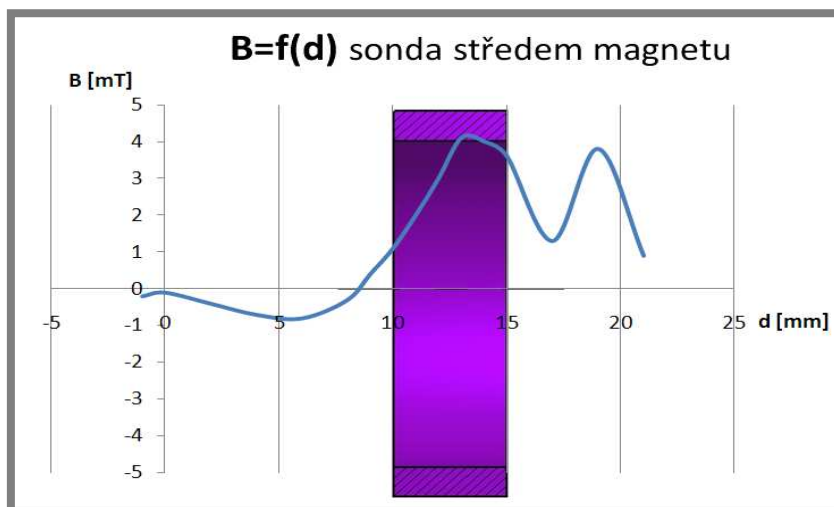
Měření magnetického pole permanentního magnetu

Aby bylo možné získat celkový obraz o distribuci magnetické indukce v okolí prstencového permanentního magnetu NdFeB 19,5x16,5x5 P, byla provedena tři měření. Při měření byl použit magnetometr se sondou STD18-0404.

V prvním měření byla měřena závislost velikosti magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu (Obr. II.2) v případě, kdy sonda prochází osou souměrnosti magnetu (Obr. II.1)

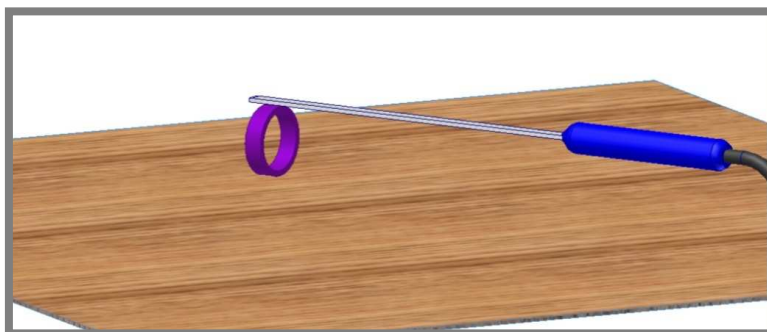


Obr. II.1 Měření magnetického pole středem magnetu.

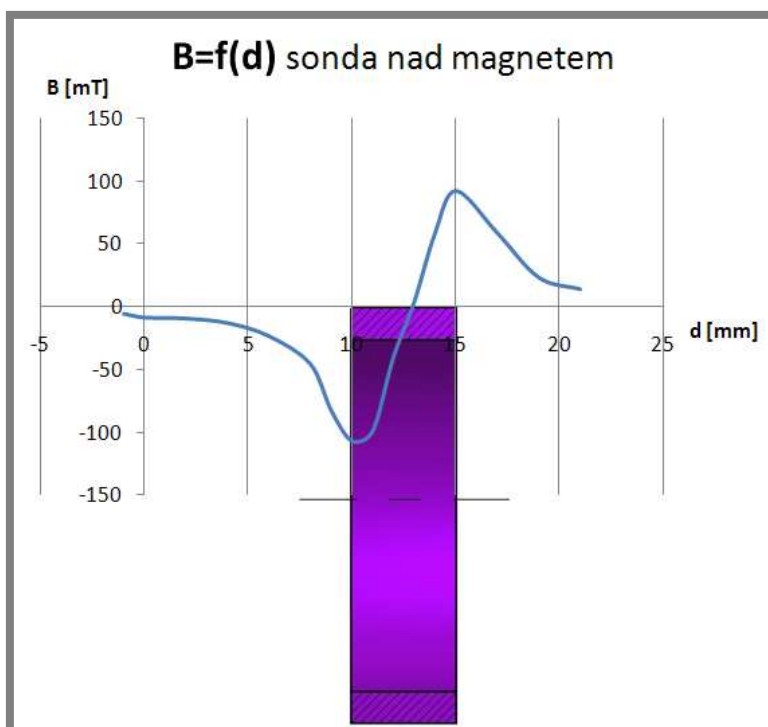


Obr. II.2 Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu

V druhém měření byla měřena závislost velikosti magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu (Obr. II.4) v případě, kdy sonda prochází nad osou souměrnosti nad magnetem (Obr. II.3).



Obr. II.3 Měření magnetického pole nad magnetem.

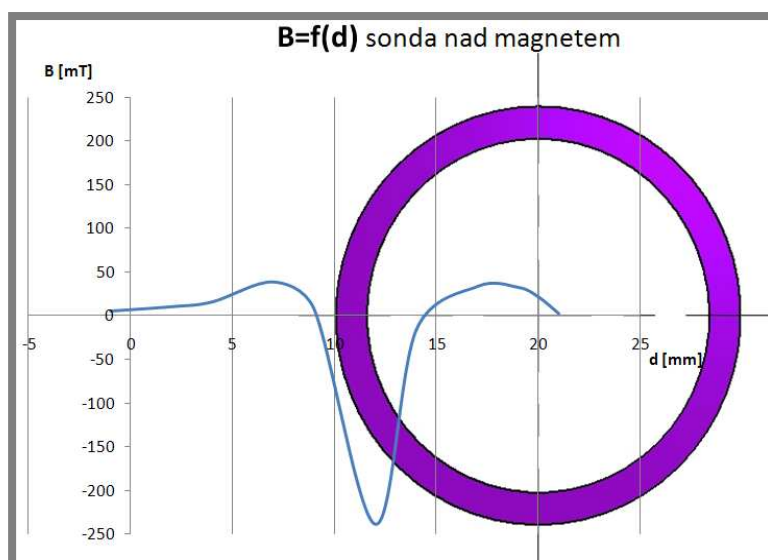


Obr. II.4 Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu

V třetím měření byla měřena závislost velikosti magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu (Obr. II.6) v případě, kdy sonda prochází nad položeným magnetem (Obr. II.5).



Obr. II.5 Měření magnetického pole nad magnetem.

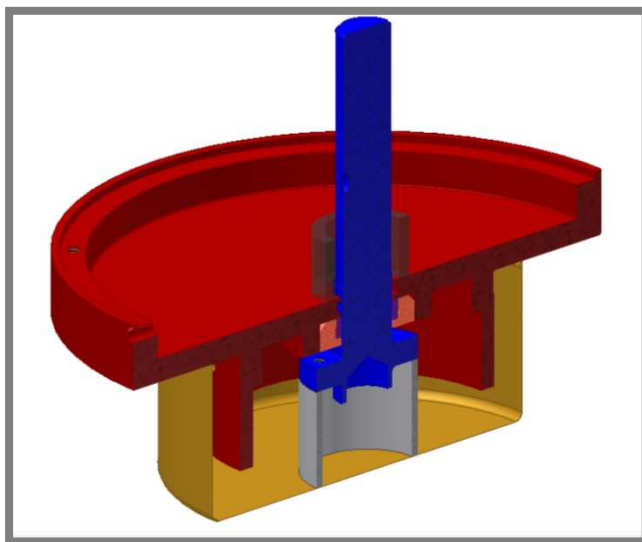


Obr. II.6 Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu

Příloha III

Zkouška funkčnosti magnetického těsnění.

Byla sestavena sestava podle Obr III.1. Do PET trubky, která byla přilepena k levé části statoru byla nalita MR kapalina a celá experimentální sestava byla ponechána 140 hodin. Poté byla zkontrolována hladina MR kapaliny. MR kapalina za celou dobu neprotékla mezerou mezi otvorem v permanentním magnetu a hřídelí, z čehož se dá vyvodit závěr o správném fungování magnetického těsnění ve statickém stavu.



Obr. III.1 Řez modelem testovací sestavy magnetického těsnění.



Obr. III.2 Fotka experimentu s magnetickým těsněním.



Obr. III.2 Fotka experimentu s magnetickým těsněním

MR kapalina otvorem neprotekla ani po odstranění hřídele (Obr. III.3).



Obr. III.3 Otvor v pravé části statoru bez hřídele.

Příloha IV

Plnění spojky

MR spojka je plněna pomocí injekční stříkačky a pevné trubičky se závitem M6. Vzhledem ke skupenství MR kapaliny je plnění třeba provádět pomalu a během celého procesu otáčet s rotorovou hřídelí. Pouze tak lze zajistit dokonalé odvzdušnění a naplnění spojky.



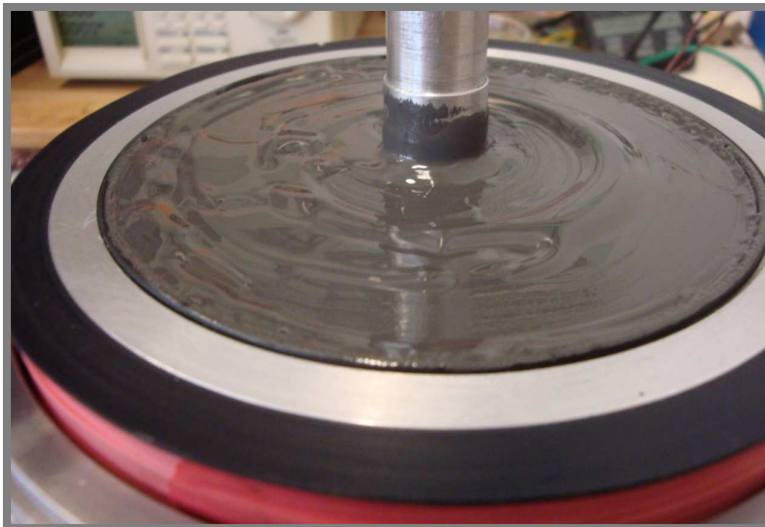
Obr. IV.1 Plnění MR spojky.

MR spojku je možné efektivně plnit pomocí zvoleného způsobu. MR kapalina zatéká do celé pracovní oblasti a spojku zcela vyplňuje (Obr. IV.2).



Obr. IV.2 MR spojka po částečném rozebrání.

O-kroužky na vnějším obvodu velice dobře zatěsňují pracovní oblast. Po rozmontování spojky nebyl zřetelný žádný únik MR kapaliny (Obr. IV.3).



Obr. IV.3 Těsnění na vnějším obvodu pracovní oblasti.

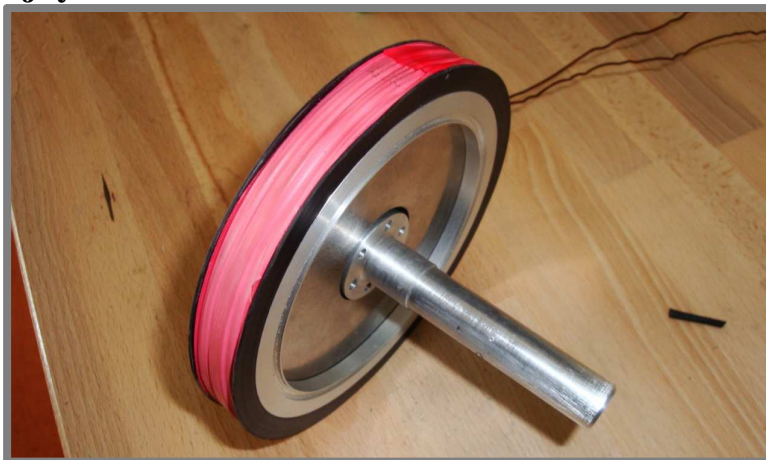
Magnetické těsnění funguje i v dynamickém režimu. Konstrukční úpravy (výměna ložiska) ani otáčení rotorové hřídele neměly na těsnost spojky znatelný vliv.



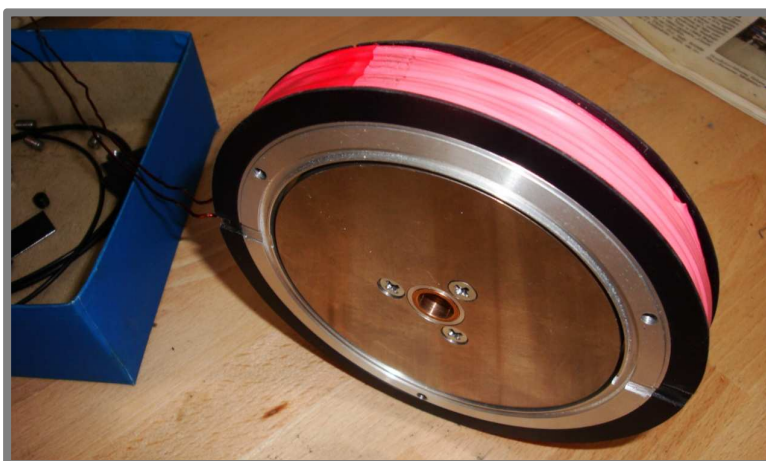
Obr. IV.4 Funkčnost magnetického těsnění.

Příloha V

Montáž spojky



Obr. V.1 Fotografie spojky před smontováním.



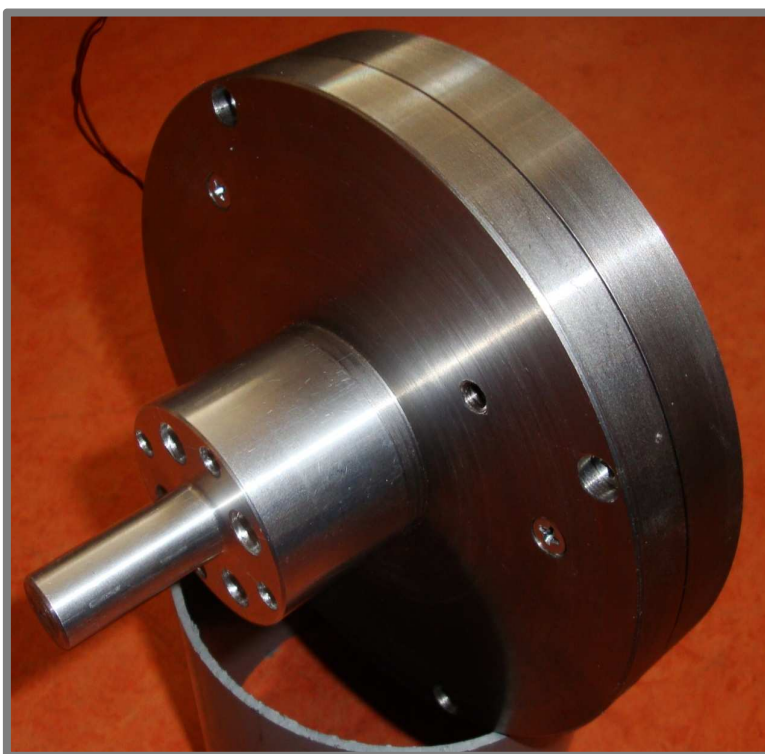
Obr. V.2 Fotografie spojky před smontováním.



Obr. V.3 Fotografie spojky před smontováním.



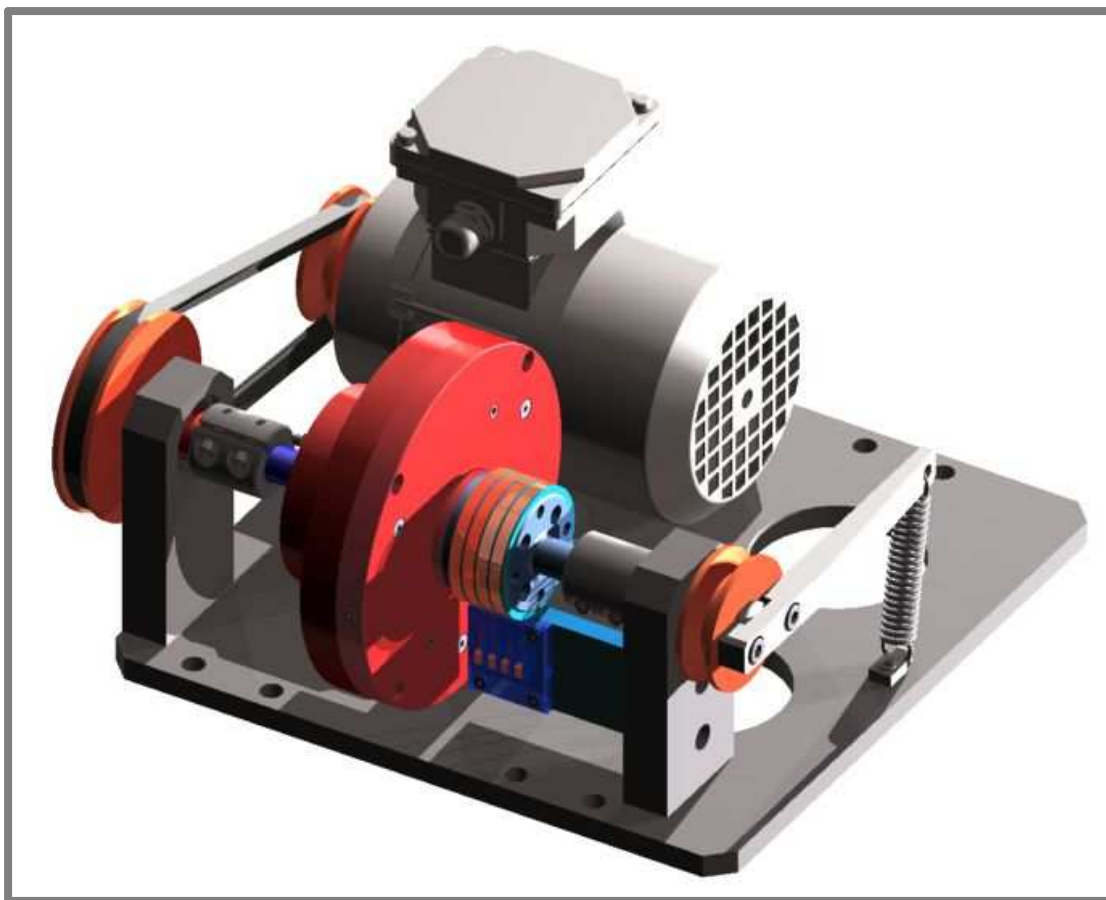
Obr. V.4 Fotografie sestavené spojky.



Obr. V.5 Fotografie sestavené spojky.

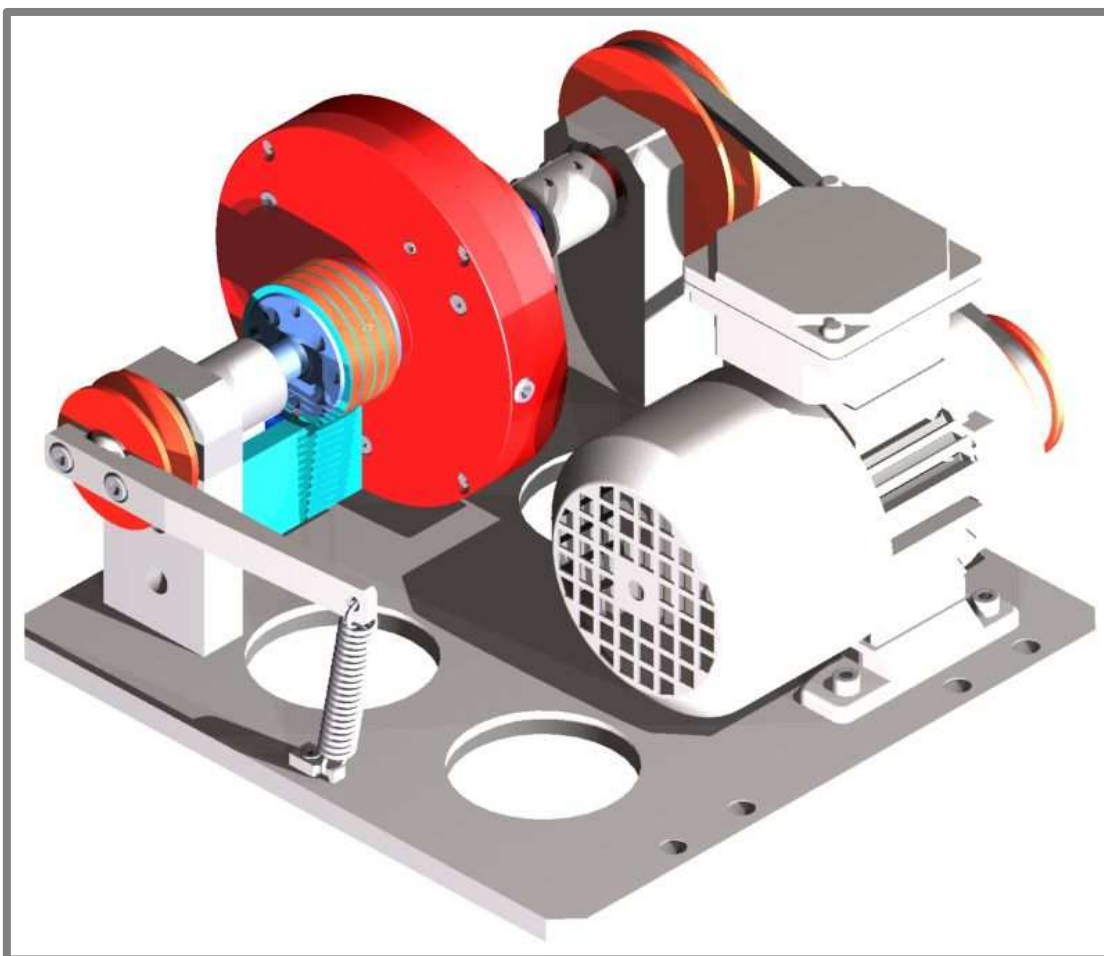
Příloha VI

Návrh jednotky pro trvanlivostní testy MR kapalin



Obr. VI.1 Jednotka pro trvanlivostní zkoušky MR kapalin.

Jednotka pro zkoušení trvanlivosti MR kapalin by mohla sestávat ze zkonstruované a vyrobené MR spojky, pohonné jednotky, řemenic, hřídelových spojek, upevňovacích stojek a podložky. Pro přesnou informaci o přenášeném krouticím momentu může být pružina nahrazena přesným tenzometrem. Po odmontování páky výstupní řemenice může zařízení fungovat i v režimu spojky, tedy s pohyblivou výstupní hřídelí.



Obr. VI.2 Jednotka pro trvanlivostní zkoušky MR kapalin.
